

Untersuchungen zum Seilsägeprozess an Stählen ausgewählter Geometrien im umschlingenden Verfahren

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften

des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Daniel Knecht

aus Bühl

Tag der mündlichen

Prüfung: 26.01.2015

Referent: Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes, Technologie und Management im Baubetrieb

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze, Institut für Produktionstechnik

Karlsruhe 2014

lucundi acti labores

Cicero, de finibus bonorum et malorum

Kurzfassung

Die vorliegende Dissertation beschreibt ein neues Modell zur Vorhersage der Schnittzeit und des Verschleißes für das umschlingende Seilsägeverfahren. Hierzu wurden die verschiedenen Einflussfaktoren in unterschiedlichen Versuchsreihen ermittelt und ausgewertet. Mit diesem neuen Modell ist es möglich, innerhalb definierter Randbedingungen zuverlässige Vorhersagen zur Schnittzeit und dem resultierenden Verschleiß zu machen.

Es wurde eine spezielle Versuchseinrichtung geplant und aufgebaut. Mit Hilfe dieser Versuchseinrichtung wurden Voruntersuchungen in Form von Schnitten durchgeführt, um die verschiedenen Einflussfaktoren, die bei einem Trennvorgang auftreten, zu ermitteln. Aufgrund der hohen Abhängigkeit zwischen diesen Parametern wurden diese anschließend anhand einer Einflussmatrix bewertet. Aus den Resultaten dieser Bewertung und den Erkenntnissen aus den Vorversuchen wurden die Randbedingungen, wie beispielsweise die Werkstückgröße, festgelegt und ein Versuchsplan erstellt. Es wurden insgesamt elf Versuchsreihen durchgeführt, die aus bis zu zehn Werkstücken bestehen. In jeder Versuchsreihe wurde nur ein Einflussparameter variiert, während die restlichen Parameter konstant gehalten wurden. Es wurden die Diamantseilgeschwindigkeit, der Vorschubdruck, der Eingriffswinkel, die Geometrie bei gleichbleibender Schnittfläche, das Werkstückmaterial und die Verdrillung des Diamantseils variiert. Somit konnte der Einfluss des jeweiligen Parameters aufgenommen, ausgewertet und in ein neues Modell überführt werden. Aus den gewonnenen Daten sind Trennzeitvorhersagen für rechteckige, quer liegende Werkstücke aus dem Werkstoff vergütetem Baustahl möglich.

Neben dem Modell wurde ein neues Kriterium entwickelt, ab welchem Zeitpunkt eine Weiterbearbeitung mit dem jeweilig eingesetzten Diamantseil nicht mehr zielführend ist und deshalb der Trennprozess abgebrochen werden sollte. Durch die Klassifizierung der Spangrößen der angefallenen Späne konnte gezeigt werden, dass eine geringere Schnittleistung zu einer Absenkung der mittleren Spangröße führt. Aufgrund dieser Tatsache wurde ein Abbruchkriterium für eine mittlere Spangröße kleiner $150\ \mu\text{m}$ festgelegt. Sobald die mittlere Spangröße unter diesen Wert fällt, verläuft der Trennprozess ineffektiv und sollte abgebrochen beziehungsweise das Diamantseil sollte getauscht werden.

Es wurden zusätzliche Untersuchungen durchgeführt, um die Kenntnisse über die Seilsäge weiter auszubauen. Da diese Versuchsreihen an rechteckigen und runden Werkstücken durchgeführt wurden, konnten keine Angaben zu den Kräften im Inneren des Werkstücks gemacht werden. Daher wurden abschließend Versuche mit teilweise eingeschnittenen Werkstücken durchgeführt, um den Kraftverlauf im Inneren des Werkstücks analysieren zu können. Ein weiteres Ziel war es, Schnitte mit einer Tauchseilsäge durchzuführen, um den großen Nachteil der in sich abhängigen Parameter beim umschlingenden Verfahren auszugleichen. Des Weiteren konnte durch einen speziellen Versuchsaufbau nachgewiesen werden, dass die vom Diamantseil auf das Werkstück übertragene Kraft auf der Seilaustragsseite gegenüber der eingestellten Vorschubkraft leicht ansteigt. Es wurden weitere Versuche zur Untersuchung und Beschreibung der Veränderung des Eingriffswinkels im Verlauf eines Schnitts mit unterschiedlichen Geometrien durchgeführt. Auch wurde der Verlauf der Eingriffslänge bei unterschiedlichen Geometrien ermittelt. Das so entstandene Modell führt zu einer effizienteren Seilsägeanwendung, da Vorhersagen zur Trennzeit und dem dabei auftretendem Verschleiß ermöglicht werden.

Abstract

This thesis illustrates a new and innovative model for the usual looping method to describe cutting time and wear. Several test series have been carried out to determine and analyze the various influencing factors. This new model now allows for exact predictions for cutting times and the resulting wear.

A special test stand was planned and built. With the help of this test stand various influencing parameters were determined in preliminary tests. Due to the high correlation between these parameters, a matrix was created to rate them. From these results and the findings of the preliminary tests, the boundary conditions such as work piece size were defined and an experimental design was created.

Eleven test series were conducted and each one consists of up to ten work pieces. In each test series, only one parameter was changed, the other influencing parameters remained unchanged. The parameter of the following characteristics were varied: the speed of the diamond wire, the feed pressure, the cutting angle, the geometry with respective cutting area, the work piece material, as well as the twisting of the diamond wire. By varying these parameters, the influence could be shown on the performance of the cutting process and also on the wear behavior of the diamond wire. A model was created from the obtained data which enables a cutting time prediction for rectangular work pieces.

In addition to the model, a new criterion has been developed, with which it is possible to quantify the progress of wear and to be able to determine a necessary wire replacement. The classification of particle sizes of the accumulated chips has shown that a lower average cutting performance results in a decrease of the average particle size. From this circumstance a termination criterion of $<150\ \mu\text{m}$ has been established. When the particle size drops below this value, the cutting process becomes ineffective and should not be continued, or the diamond wire should be replaced, respectively.

Furthermore, other studies were conducted to further increase the understanding of the wire cutting process. Parts of work pieces were cut in order to better analyze the local forces. An attempt was made with an underwater wire cutter to compensate for the great disadvantage of the parameter correlation in the looping method in order to achieve a better isolation of the influencing parameters. A special setup showed that the force the diamond wire applies to the work piece is slightly increased on the output side compared to the set feed force. On the work piece's inlet side this value is, if only initially, just one-third of the set feed force. Another special setup was dedicated to the examination and description of a change in the cutting angle in the course of a section using different geometries. Also, the change of the wire's contact length in different work piece shapes was determined.

The resulting model provides a more efficient diamond wire cutting process because predictions of the required separation time and thereby of the accumulating wear are now possible.

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Die dieser Arbeit zugrunde liegenden Untersuchungen wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes, das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde, durchgeführt.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes für die Übernahme des Hauptreferates und für die Unterstützung und Förderung, die ich während meiner Tätigkeit am Institut und bei der Erstellung dieser Arbeit erfahren habe.

Ebenso gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze vom Institut für Produktionstechnik (wbk) für die Übernahme des Korreferats.

Meinen Freunden und ehemaligen Kollegen am Institut für Technologie und Management (TMB) Herrn Dr.-Ing. Harald Schneider, Herrn Dipl.-Ing. Patrick Kern, Herrn Dipl.-Ing. Steffen Reinhard, Herrn Dipl.-Ing. Sebastian Hentschel, Herrn Dipl.-Wi.-Ing. Gernot Hickethier, Frau Dipl.-Ing. Christina Freund, Herrn Dipl.-Ing. Tobias Bregenhorn, Herrn Dipl.-Ing. Akramullah Aminy, Herrn M.Sc. Kim Kirchbach, Frau M.Sc. Ahlam Mohamad, Herrn Dipl.-Ing. Thorsten Gehrlein, Herrn Dipl.-Ing. Martin Brandauer, Frau Dipl.-Wi.-Ing. Annett Schöttle, Frau Dipl.-Ing. Hedjeh Emami-Far, sowie den Mitarbeitern der Werkstatt danke ich für die vielen wertvollen Anregungen und deren Unterstützung.

Ferner gilt allen Freunden und Kollegen am TMB mein Dank für die wertvolle und schöne Zeit am TMB, in der ich sehr viel aus dem Bauingenieurwesen gelernt habe. Zudem möchte ich den wissenschaftlichen Hilfskräften danken, die mir bei meiner Arbeit mitunter tatkräftig behilflich waren.

Im Rahmen des Forschungsprojektes erhielt ich besondere Unterstützung von Herrn Ernst Siegenthaler von der Hilti Corporation in Schaan, Liechtenstein, ohne dessen praktische Unterstützung und hilfreiche Hinweise diese Arbeit so nicht entstanden wäre.

Meine Freude über den Abschluss dieser Arbeit teile ich mit meiner Frau, meinen langjährigen Freunden, meiner Familie und besonders meinen Eltern, die meinen Werdegang ermöglicht und mich jederzeit unterstützt haben.

Daniel Knecht

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Zielsetzung.....	1
2	Grundlagen	3
2.1	Trennverfahren.....	3
2.1.1	Thermische Trennverfahren.....	3
2.1.2	Mechanische Trennverfahren.....	5
2.2	Verfahrenseinordnung Seilsäge.....	7
2.3	Funktionsweise einer Seilsäge.....	8
2.4	Vor- und Nachteile der Seilsägetechnologie.....	10
2.5	Anwendungsgebiete.....	14
2.5.1	Natursteingewinnung.....	14
2.5.2	Bauindustrie.....	15
2.5.3	Abbruch und Rückbau.....	16
2.6	Anwendungsarten.....	18
2.6.1	Umschlingendes Verfahren.....	18
2.6.2	Tiefenschnittverfahren.....	19
2.7	Maschinentechnik.....	20
2.8	Werkzeug.....	21
2.8.1	Aufbau des Werkzeuges.....	22
2.8.2	Herstellungsarten für Diamantsegmente.....	24
2.8.3	Synthetische Kornwerkstoffe.....	26
2.8.4	Synthetischer Diamant.....	27
2.8.5	Spanbildungsprozess.....	28
2.8.6	Prozessgrößen beim Seilsägen.....	31
2.8.7	Energieverteilung.....	34
2.8.8	Verschleiß.....	35
2.9	Korngrößenverteilung.....	38
3	Versuchseinrichtungen	40
3.1	Aufbau Seilsäge Versuchsstand.....	40
3.1.1	Seilsäge.....	40
3.1.2	Wasserbecken.....	41
3.1.3	Wechselvorrichtung.....	42
3.1.4	Werkzeuge.....	43
3.1.5	Werkstücke.....	43

3.2	Messtechnik	46
3.2.1	Siebeinrichtungen	46
3.2.2	Messeinrichtungen am Seilsägeversuchsstand.....	48
3.3	Systemparameter	51
3.3.1	Eingangsparameter	51
3.3.2	Ausgangsgrößen.....	52
3.4	Einflussmatrix.....	54
3.5	Versuchsreihen	59
4	Ergebnisse der Versuchsreihen.....	62
4.1	Versuchsreihe 1 - quer, liegend.....	62
4.2	Versuchsreihe 2 - rund.....	65
4.3	Versuchsreihe 3 - hochkant, stehend	68
4.4	Versuchsreihe 4 - hochkant, unverdrillt.....	71
4.5	Versuchsreihe 5 - doppelt, hochkant	73
4.6	Versuchsreihe 6 - quer, alternativer Eingriffswinkel	76
4.7	Versuchsreihe 7 - rund, alternativer Eingriffswinkel	79
4.8	Versuchsreihe 8 - quer, erhöhter Vorschubdruck	82
4.9	Versuchsreihe 9 - quer, verminderte Schnittgeschwindigkeit.....	84
4.10	Versuchsreihe 10 - quer, nichtrostender Stahl.....	86
4.11	Versuchsreihe 11 - rund, nichtrostender Stahl.....	88
5	Zusätzliche Untersuchungen.....	91
5.1	Partielle Werkstückunterteilung	91
5.2	Versuche mit Tauchseilsäge	96
5.3	Krafterhöhung auf der Austrittsseite	98
5.4	Zeitlicher Eingriffswinkelverlauf	101
5.5	Ermittlung der Eingriffslänge	103
5.6	Nutzen der zusätzlichen Versuche	106
6	Diskussion.....	107
6.1	Vergleich der Schnittleistungen	107
6.2	Verschleiß	108
6.2.1	Mittlere Trennzeiterhöhungen.....	108
6.2.2	Mittlere Abnahme der Trennleistung.....	109
6.3	Leistungsfaktor zur Bewertung des Trennprozesses	111
6.4	Schnittgeschwindigkeit	113
6.5	Verdrillung.....	115
6.6	Vorschubdruck	117

6.7	Eingriffswinkel	119
6.8	Geometrie	123
6.9	Spangrößen	126
6.10	Modell	128
6.10.1	Modellerstellung.....	128
6.10.2	Verifikation	131
7	Bewertung.....	133
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	135
8.1	Zusammenfassung.....	135
8.2	Ausblick.....	136
	Formelzeichen	138
	Abbildungsverzeichnis	139
	Tabellenverzeichnis	142
	Literaturverzeichnis	143
	Anhang A	150
	Anhang B	163
	Anhang C	164

1 Einleitung

Das Trennverfahren Seilschleifen, das allgemein in der Praxis als Seilsägen bezeichnet wird, ist seit mehreren hundert Jahren in der Natursteinbearbeitung im Einsatz. Ihren Ursprung fand die Seilsäge in Steinbrüchen, beim Trennen großer Steinblöcke. Die spanende Verarbeitung der Natursteine erfolgte bis vor etwa 60 Jahren ausschließlich unter Einsatz von losem Schneidkorn. Bis zu dieser Zeit kamen Maschinen zum Einsatz, die der von Giovanni Branca bereits in seinem Werk "Le Maccine" 1629 beschriebenen Maschinen entsprachen. Lose Schneidkörner wie Quarzsand, Siliziumkarbid oder Stahlschrott wurden den Seilen zugegeben und meist mit Muskel- oder Wasserkraft zyklisch über das zu trennende Werkstück geführt, so dass dieses langsam abgeschliffen werden konnte. Dieses Verfahren ist sehr zeitaufwändig und arbeitsintensiv [1][2][3].

Mindestens 300 Jahre lang war diese Technik im Einsatz, bis in den 1970er Jahren von Herrn Panhorst das Seilsägen von Gesteinen mit diamantimprägnierten Körnern, die auf das Seil aufgebracht wurden, untersucht wurde. Gegenüber dem herkömmlichen Trennverfahren konnte die Mengenleistung mit dem Einsatz von Industriediamanten als gebundenes Korn sprunghaft gesteigert werden [1]. So wurde von einer Erhöhung der ausgebrachten Sägefläche pro Zeiteinheit beim Ersatz eines Stahlsandpendelgatters durch ein Diamantgatter um das Fünffache berichtet [4].

Seit 1984 hat dieses Verfahren Eingang in die Steinindustrie und in die großen Marmorsteinbrüche gefunden. Ab diesem Zeitpunkt nahm der Einsatz der Diamantseilsäge auch außerhalb der Steinbrüche stetig zu. Vor allem in der Bauindustrie werden Seilsägen eingesetzt, um nachträglich Öffnungen, größere Durchbrüche oder sehr große Schnitttiefen durchzuführen. Gerade bei sehr großen Schnitttiefen sind Seilsägen gegenüber dem konventionellen Verfahren, wie beispielsweise mit dem Trennen durch Schleifscheiben, im Vorteil, da sie sich aufgrund des flexiblen Diamantseils auch größeren Strukturen anpassen und diese somit trennen können.

Neben dem Einsatz an Gesteinsmaterialien, wie beispielsweise Beton, hält die Seilsägetechnologie auch vermehrt Einzug beim Trennen von komplexen Stahlstrukturen, die schwer erreichbar oder mit konventionellen thermischen Trennverfahren nur bedingt realisierbar sind. Zum Anwendungsbereich im Stahlbau gehört ebenfalls der Rückbau von Offshore-Plattformen, Schiffswracks und U-Booten [5].

Besonders beim Trennen von Stahlstrukturen sind die Parameter für einen optimalen Betrieb beziehungsweise die Vorhersage der Trennzeit unzureichend. Auswertungen haben ergeben, dass in der Praxis signifikante Abweichungen zu der theoretisch vorhergesagten Trenndauer auftreten. Solche Vorhersagen beruhen immer nur auf dem empirischen Wissensstand des Bedieners und sind nicht wissenschaftlich belastbar. Ein wissenschaftliches Modell existiert bisher nicht.

1.1 Motivation und Zielsetzung

Für die Ertüchtigung und den Rückbau von kerntechnischen Anlagen hat das automatisierte und fernhantierte Zerlegen von Einbauten und Stahlbetonstrukturen eine große Bedeutung. Dies ermöglicht es, Prozesse zu optimieren, Personalaufwand zu verringern und damit die

Kosten zu reduzieren. Aber auch abseits von diesen wirtschaftlichen Gesichtspunkten spielt die Minimierung der Personendosis im Bereich des Rückbaus kerntechnischer Anlagen eine wichtige Rolle.

Unter diesem Aspekt werden in der Abteilung „Technologie und Management des Rückbaus kerntechnischer Anlagen“ (TMRK) am „Institut für Technologie und Management im Baubetrieb“ (TMB) des „Karlsruher Institut für Technologie“ (KIT) Verfahren und Gerätschaften erforscht und optimiert, die den Anforderungen, wie beispielsweise der Reduktion der Dosisleistung für das Personal in Kontrollbereichen, gerecht werden.

In diesem Zuge wird das Seilsägeverfahren untersucht und weiterentwickelt, um mit möglichst geringem Personaleinsatz kontaminierte Kraftwerkskomponenten unter Wasser effektiv zu zerlegen. Ein wichtiger Gesichtspunkt bei Zerlegeverfahren, die für die Stilllegung kerntechnischer Anlagen und hierbei insbesondere für hochaktivierte Bauteile eingesetzt werden sollen, ist die Anwendbarkeit unter Wasser. Die Zerlegung der Reaktoreinbauten, also der hochaktivierten Bauteile des Kerns, erfordert in den meisten Fällen aus Strahlenschutzgründen das Arbeiten unter der abschirmenden Wirkung des Wassers. Aus diesem Grund mussten viele Techniken, die in handelsüblicher Anwendung nur für den Einsatz an Luft geeignet sind, entsprechend adaptiert werden [1].

Gegenüber anderen Zerlegeverfahren bietet die Seilsägetechnologie mit Diamantseilen wesentliche Vorteile. So ist es durch ein hohes Maß an Flexibilität der Schneidgeometrie möglich, komplexe Strukturen unabhängig von Schnitttiefe und Geometrie des Werkstückes zu trennen. Benötigt werden nur geringe Rüstzeiten, die auch im hohen Maße von der Mobilität der Säge profitieren.

Nachteilig sind die relativ hohen Schnittbreiten von ca. 12 mm und die damit anfallenden großen Mengen an Aerosolen, die vor allem beim Rückbau von kontaminierten Werkstücken freigesetzt werden. Um eine Kontaminationsverschleppung zu vermeiden, müssen diese freigesetzten Stäube durch spezielle Absaugvorrichtungen aufgefangen werden.

Ein weiterer Nachteil sind die hohen Kosten für das Werkzeug in Form der Diamantseile. Diese müssen eventuell, falls eine Freimessung nicht möglich ist, ebenfalls nach dem Schnitt kostenintensiv entsorgt werden. Um diese Entsorgungskosten zu minimieren, ist es erforderlich, den genauen Zustand des Diamantseils zu kennen. Dies wird durch Abschätzen der noch effektiv zu schneidenden Fläche erreicht, damit eine optimale Ausnutzung der Diamantseile gewährleistet ist.

Des Weiteren wird durch einen effektiven Trennprozess der Verschleiß am Diamantseil gering gehalten und zusätzlicher Sekundärabfall, in Form weiterer verbrauchter Diamantseile, vermieden.

Ziel der Arbeit ist es, aus den ermittelten Daten ein Modell zu erstellen, das eine Vorhersage der Trennzeit für Seilsägearbeiten, in Abhängigkeit der verschiedenen Einflussparameter, wie beispielsweise der Geometrie, ermöglicht. Damit werden genaue Aussagen möglich, was die Planungssicherheit und damit die Wirtschaftlichkeit steigert.

2 Grundlagen

2.1 Trennverfahren

Trennverfahren werden unter anderem unterteilt in thermische und mechanische Trennverfahren. Der Begriff „Trennen“ ist definiert als das Formändern eines festen Körpers durch das örtliche Aufheben des Zusammenhalts [6].

2.1.1 Thermische Trennverfahren

Bei thermischen Trennverfahren wird der zu trennende Werkstoff mittels einer geeigneten Energiequelle auf hohe Temperatur erwärmt. Diese Erwärmung findet lokal begrenzt statt. Abhängig vom Werkstoff kann dieser verbrennen, schmelzen oder verdampfen, wodurch im Bauteil bei bewegter Energiequelle eine Fuge entsteht. Unter anderem fallen dabei formlose Produkte wie Stäube, Schmelzen und Dämpfe an. Thermische Trennverfahren sind besonders an Stahlwerkstoffen sehr weit verbreitet.

2.1.1.1 Autogenes Brennschneiden

Brennschneiden ist nach DIN 2310 ein thermisches Trennverfahren, das mit einer Brenngas-Sauerstoff-Flamme und Schneidsauerstoff ausgeführt wird. Das Werkstück wird durch eine Brenngas-Sauerstoff-Flamme auf Zündtemperatur erwärmt und in einem fortlaufenden Verbrennungsprozess im Schneidsauerstoffstrahl exotherm verbrannt. Das autogene Brennschneiden eignet sich für unlegierte und niedriglegierte Stähle sowie für Molybdän und Titan. Das Verfahren ist an Luft und auch unter Wasser für Materialstärken zwischen 3 und 200 mm einsetzbar [6].

Bei Anwendung des Pulverbrennschneidens ist auch das Zerlegen von Betonstrukturen möglich, wobei die zum Aufschmelzen des Werkstoffs benötigte Energie aus der Verbrennung eines aus Eisen- und Aluminiumpulver bestehenden Brennschneidpulvers im Sauerstoffstrahl gewonnen wird. Hauptanwendungsgebiet beim Rückbau kerntechnischer Anlagen ist die Zerlegung von austenitisch plattierten, ferritischen Werkstoffen. Da keine Rückstellkräfte auftreten, ist das Verfahren zudem für eine Fernhantierung geeignet. Zur Zerlegung dickwandiger, austenitisch plattierter, ferritischer Werkstoffe wurden Hybrid-Schneidverfahren, wie das Lichtbogenwasserstrahlschneiden in Kombination mit dem autogenen Brennschneiden unter Wasser qualifiziert. Das autogene Brennschneiden ist in der Industrie stark verbreitet und kann als weit entwickeltes, vielseitiges Verfahren bezeichnet werden, das jedoch zu vergleichsweise hohen Freisetzungen von Aerosolen führt [7].

2.1.1.2 Plasmaschneiden

Dieses Verfahren zählt zu den Lichtbogen-Trennverfahren und verwendet einen Plasmastrahl zum Schneiden von metallischen Werkstoffen. Plasmaschneiden ist ein thermisches Schneidverfahren, bei dem der metallische Werkstoff durch den Plasmastrahl geschmolzen und aus der Schnittfuge geblasen wird. Zu Prozessbeginn wird im Plasmabrenner mittels Hochspannungszündung ein nicht übertragender Pilotlichtbogen generiert, der zwischen Kathode und der als Anode dienenden Schneiddüse brennt. Durch

ausströmende und expandierende Gase wird er aus der Düse geblasen. Berührt der Pilotlichtbogen das Werkstück, wird der übertragende Hauptlichtbogen gezündet. Die Plasmaquelle schaltet selbständig den vollen Schneidstrom zu. Parallel wird die Schneiddüse elektrisch neutral geschaltet. Der Plasmastrahl schmilzt das zu trennende Material auf und verdampft es teilweise. Die Schmelze wird durch die kinetischen Schubkräfte des Gasstrahls aus der entstehenden Schnittfuge geblasen.

Entwickelt wurde es zum Trennen von Metallen mit schlechter Eignung zum Brennschneiden, wie Aluminium, Kupfer und deren Legierungen, hochlegierte Stähle, aber auch Hartmetall. Vom Brennschneiden unterscheidet sich das Plasmaschneiden grundsätzlich dadurch, dass das erstere einen chemischen Prozess darstellt, bei dem Eisen zu Eisenoxid umgewandelt wird, während beim Plasmaschneiden das Metall aufgeschmolzen wird [6].

Das Plasmaschneiden zeichnet sich durch eine gute Schnittqualität und eine hohe Schnittgeschwindigkeit bei vergleichsweise geringen Kosten aus. In vielen Bereichen der Industrie ist es daher bereits weit verbreitet und ein fester Bestandteil der Fertigung.

2.1.1.3 Laserschneiden

Das Laserschneiden ist ein Oberbegriff für drei verschiedene Prozessarten: das Laserstrahlbrennschneiden, das -schmelzschnitten und das -sublimierschnitten. Der Laserstrahl stellt kein Schneidwerkzeug dar, er ist nur der Lieferant der zur Werkstofftrennung erforderlichen Energie. Beim Auftreffen des Laserstrahls auf das Bauteil wird dieser vom Werkstoff absorbiert. Das Schneiden erfolgt dabei umso leichter, je höher die Absorptionsfähigkeit des Werkstoffs ist. Diese ist wiederum von der Wellenlänge des Strahls abhängig. Der Strahl des zumeist verwendeten CO₂-Lasers hat eine feste Wellenlänge von 10,6 µm (Infrarotbereich). Er wird somit nicht von allen Werkstoffen gleich gut absorbiert, was zu einer unterschiedlichen Trennfähigkeit führt.

Das Laserbrennschneiden eignet sich nur zum Schneiden von oxidierbaren metallischen Werkstoffen. Zusätzlich zum Laserstrahl, der hier als „Heizflamme“ dient, wird dabei über eine zum Strahl konzentrische Schneiddüse Sauerstoff zugeführt. Wie beim autogenen Brennschneiden verbrennt der Werkstoff im Sauerstoffstrom, wobei eine dünnflüssige Schlacke entsteht, die vom Druck des Gasstroms aus der Fuge geblasen wird. Beim Schmelz- und Sublimierschnitten wird der Werkstoff in der Schnittfuge aufgeschmolzen oder direkt verdampft.

Mit einem Laser von 1,2 kW Leistung lassen sich bei Baustählen Bleche mit einer Dicke von 2 mm bei einer Schnittgeschwindigkeit von 5 m/min trennen; bei einem rostfreien Stahl sind unter gleichen Bedingungen noch 4 m/min erreichbar [6][8][9].

Neben diesen drei aufgeführten Hauptverfahren im Bereich des thermischen Trennens gibt es noch viele weitere Spezialverfahren, auf die jedoch nicht weiter eingegangen wird. So gibt es beispielsweise noch das Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden (CAMC), Funkenerosion (electro discharge machining, EDM), Lichtbogen-Wasserstrahl-Schneiden beziehungsweise Lichtbogen Sauerstoff-Schneiden sowie der Abtrag durch Mikrowellen, der sich jedoch noch weiter in der Erforschung und Entwicklung befindet.

2.1.2 Mechanische Trennverfahren

Mechanische Trennverfahren erzeugen die Schnittfuge durch einen mechanischen Materialabtrag. Trennen ist Fertigen durch das Ändern der Form eines festen Körpers. Dabei wird der Zusammenhalt örtlich aufgehoben, das heißt im Ganzen vermindert [10]. Ein Aufschmelzen oder eine Verbrennung des Materials sowie der Einsatz von Schneidgasen findet nicht statt. Die beim Trennen entstehenden Partikel (Späne, Stäube) sind leicht durch Filter aufzufangen. Der Anwendungsbereich mechanischer Zerlegeverfahren umfasst Metalle und andere Baustrukturen gleichermaßen.



Abbildung 1: Trennen und Einteilung der Verfahren (auszugsweise) nach DIN 8580 [11]

Mechanische Trennverfahren sind laut dem Deutschen Institut für Normung nach DIN 8580 geordnet [11]. Das charakteristische Merkmal der Gruppe 3 dieser Normung ist das Trennen. Es wird definiert als das örtliche Aufheben des Stoffzusammenhalts. Abbildung 1 gibt einen Einblick über die Aufteilung der Hauptgruppe 3 für die Untergruppen Spanen mit geometrisch bestimmten und unbestimmten Schneiden mit den entsprechenden DIN-Normen. Neben diesen Untergruppen bestehen weitere Verfahren wie beispielsweise das Abtragen oder Zerlegen.

Weitere Verfahrensunterteilungen werden in die Kategorien Abtragen, Zerlegen und Reinigen vorgenommen. Da diese Trennverfahren für diese Arbeit nur geringe Relevanz besitzen, werden nur ausgewählte Verfahren des Spanens mit geometrisch bestimmten und unbestimmten Schneiden näher betrachtet.

2.1.2.1 Sägeverfahren

Zuerst wird das Sägeverfahren, also das dem Seilsägeverfahren namensgebende Verfahren, beschrieben. Sägeverfahren gehören der Untergruppe der geometrisch bestimmten Schneiden an. Es ist ein spanendes Verfahren mit kreisförmiger oder geradliniger Schnittbewegung. Sägen wird beispielsweise zum Verkleinern von Stangen- und Profilmaterial, zum Trennen von Werkstücken und zum Ausschneiden von Durchbrüchen in

Platten sowie zum Einschneiden von Nuten und Schlitzten angewandt. Dabei führt das vielschneidige Werkzeug die Vorschub- und die Schnittbewegung aus.

Sägeblätter für Hand- und Maschinensägen besitzen eine Vielzahl hintereinander liegender Zähne mit geringer Schnittbreite. Sie weisen eine Keilform auf und sind gehärtet. Der Werkstoff wird durch die Schneiden gleichzeitig auf mehreren Ebenen zerspant. Die Spanräume beziehungsweise die sogenannten Zahnücken nehmen die Späne auf und führen sie aus der Schnittfuge heraus. Um den Werkstoffkosten entgegenzuwirken wird zunehmend angestrebt, die Schnittkanäle schmal und somit den Schnittverlust möglichst gering zu halten, sowie ein Verlaufen des Schnitts möglichst zu verhindern.

Beim tieferen Eindringen eines glatten Sägeblattes in den Werkstoff vergrößert sich die Reibung an den Seiten, weshalb es sich seitlich freischneiden muss. Um dies zu ermöglichen, sind bei bandförmigen Sägeblättern entweder die Zähne geschränkt, also abwechselnd nach rechts und links ausgebogen, oder gewellt. Bei gewellten Sägeblättern sind jeweils ungefähr sechs bis acht Zähne in Wellenform nach links und rechts ausgebogen. Gewellte Sägeblätter sind besonders bei feiner Zahnteilung zweckmäßig. Kreisförmige Maschinensägeblätter aus Schnellarbeitsstahl sind entweder hohlgeschliffen, gestaucht oder haben Zahnsegmente oder ganze Zähne aus Hartmetall [12]

2.1.2.2 Drehverfahren

Ebenfalls in die Kategorie „Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide“ fällt das Drehverfahren. Das Drehverfahren ist die spanende Bearbeitung der Umdrehungsflächen eines Werkstückes mit einem meist einschneidigen Werkzeug, dem Drehmeißel. In der Regel führt das Werkstück die Drehbewegung aus [12]. Die Drehachse der Schnittbewegung ist werkstückgebunden, das bedeutet, sie behält ihre Lage zum Werkstück unabhängig von der Vorschubbewegung bei [10]. Die Spanabnahme erfolgt durch das Zusammenspiel von Schnitt- und Vorschubbewegung.

2.1.2.3 Fräsverfahren

Fräsverfahren sind neben dem Drehen ein wesentlicher Teil der spanenden Fertigung. Fräsen ist ein Verfahren, mit dem sich mit meist mehrzahnigen Werkzeugen bei kreisförmiger Schnittbewegung und senkrecht oder auch schräg zur Drehachse gerichteter Vorschubbewegung nahezu beliebig geformte Werkstückflächen erzeugen lassen. Wesentliche Verfahrensmerkmale sind die im Gegensatz zu anderen Verfahren sich stetig verändernden Eingriffsverhältnisse. Ein unterbrochener Schnitt und die in Abhängigkeit vom Vorschubrichtungswinkel nicht konstanten Spannungsdicken und damit verbundenen Schnittkraftschwankungen erfordern ein gutes dynamisches Verhalten des Systems Werkstück - Werkzeug - Werkzeugmaschine [10].

2.1.2.4 Bohren, Senken, Reiben

Um eine Seilsäge einzusetzen, sind in den meisten Fällen Bohrungen als vorbereitende Maßnahme notwendig. Diese werden in das zu trennende Werkstück gebohrt um eine genaue Seilführung beziehungsweise eine positionsgetreue Schnittführung zu gewährleisten. Das Diamantseil wird durch die Bohrungen hindurchgeführt. Es können ebenfalls Bohrungen in den Boden eingebracht werden um die Antriebseinheit der Seilsäge fixieren zu können.

Bohren ist ein spanendes Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide. Durch die Vorschubkraft dringen die Werkzeugschneiden in den Werkstoff ein. Die kreisförmige Schnittbewegung erzeugt die Schnittkraft [12].

Zu erwähnen ist, dass es ab einem bestimmten Durchmesser einfacher ist, mit sogenannten Hohlkernbohrern zu arbeiten. Ein Hohlkernbohrer zerspant ähnlich einer Lochsäge eine ringförmige Nut, um den Bohrkern des zu bearbeitenden Materials als Ganzes zu entfernen. Hohlkernbohrer werden jedoch selten als vorbereitende Maßnahme für das Seilsägen eingesetzt.

2.1.2.5 Wasserabrasivstrahlschneiden

Beim Wasserabrasivstrahlschneiden werden mineralische Partikel in einen Hochgeschwindigkeits-Wasserstrahl zugegeben und auf das zu trennende Werkstück geschossen. Mit diesem Verfahren können nahezu alle üblichen Materialarten getrennt werden. Die Vorteile bestehen insgesamt in der geringen Baugröße und der guten Handhabbarkeit des Werkzeugs sowie der universellen Einsetzbarkeit zum Trennen, Abtragen und Reinigen bei nahezu allen technischen Werkstoffen.

Durch die fehlende Berührung des Werkstücks entstehen nur sehr kleine Rückstellkräfte, was den Einsatz des Verfahrens auf Manipulatoren ermöglicht. Durch geringe Fugenbreiten werden die Primärabfallmengen reduziert, es entsteht aber Sekundärabfall durch verbrauchtes Strahlmittel, dessen Menge durch Rückführung vermindert werden kann. Als Abrasivmittel finden Zirkonkorund, Barton Garnet und Olivin Anwendung. Bei Einsatz unter Wasser müssen spezielle Filteranlagen eingesetzt werden, um einer starken Wassertrübung durch die Abrasivpartikel entgegenzuwirken [7].

Der wesentliche Nachteil des Wasserstrahlschneidens ist der Anfall von Sekundärabfall. Das als Schneidmedium genutzte Abrasivmittel bildet während des Schneidvorganges mit dem abgetragenen Schnittfugenmaterial ein Gemisch. Beispielsweise fällt bei der Zerlegung eines Reaktordruckbehälters, abhängig von der erforderlichen Gesamtschnittlänge, Sekundärabfall in Größenordnungen von mehreren Tonnen an [13].

2.2 Verfahrenseinordnung Seilsäge

Es ist nicht möglich, das Seilsägeverfahren eindeutig nach der DIN 8589 einzuteilen. Sicherlich ist die Hauptgruppe des Trennens (Gruppe 3) als Oberbegriff zu nennen. In der Geschichte wurde das „Seilsägen“ mit losem gebundenem Korn und mit geometrisch unbestimmter Schneide durchgeführt. Dazu wurden Abrasivmittel wie Quarzsand, Siliziumkarbid oder Stahlschrott den Seilen zugegeben und meist mit Muskel- oder Wasserkraft zyklisch über das zu trennende Werkstück geführt, bis die entsprechende Fuge hergestellt war [2]. Dieses Verfahren mit losem Schneidkorn und geometrisch unbestimmter Schneide ist nach DIN 8589 Teil 15 eigentlich ein Läppvorgang [14]. Nach dem heutigen Stand der Technik sind die Schneidsegmente, auf denen die Diamanten befestigt sind und die in Abschnitt 2.8 genauer vorgestellt werden, direkt auf dem Seil aufgebracht; das bedeutet, sie sind auf dem Seil gebunden. Im Gegensatz zur früheren Verwendung ist die Bearbeitung mit gebundenem Korn nach DIN 8589 Teil 11 und 12 ein Schleifvorgang [15][16]. Die Körner sind gebunden, jedoch ist die Anzahl, Lage und Geometrie der Schneiden unbestimmt.

Wird DIN 8589 Teil 11 zu Grunde gelegt, so könnte es als Längsschleifen interpretiert werden. Abbildung 2 zeigt das Längsschleifen. Es ist ein Schleifen, bei dem die verfahrenskennzeichnende gerade oder kreisförmige Vorschubbewegung parallel zur erzeugenden Oberfläche verläuft [15].

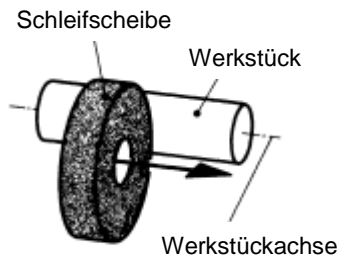


Abbildung 2: Längsschleifen [15]

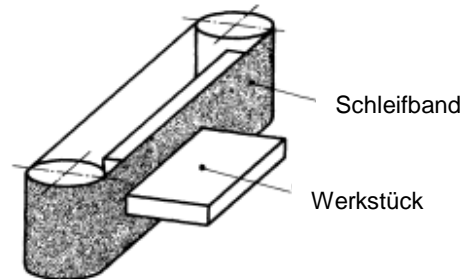


Abbildung 3: Seiten-Bandschleifen [14]

In DIN 8589 Teil 12 sind die unterschiedlichen Arten von Bandschleifverfahren aufgelistet. Das Bandschleifen ist definiert als ein spanendes Fertigungsverfahren mit einem vielschneidigen Werkzeug aus Schleifkörnern, die auf einer Unterlage befestigt sind. Dieses Schleifband läuft über mindestens zwei rotierende Rollen und wird an der Kontaktfläche durch eine dieser Rollen, ein anderes zusätzliches Stützelement oder auch ohne ein Stützelement an das zu schleifende Werkstück angepresst. Die auf dem Schleifband liegenden geometrisch unbestimmten Schneiden trennen mit hoher Geschwindigkeit, unter nichtständiger Berührung zwischen Werkstück und Schleifkorn, den Werkstoff ab [16].

Das Seilsägen kann durch die beiden Normen nur unzureichend beschrieben werden. Eine vollständig richtige Zuordnung des Seilsägeverfahrens in einen der genannten Bereiche ist nicht möglich.

Ein weiterer irreführender Aspekt, der eine Einordnung erschwert, ist der für das Verfahren eingeführte und gebräuchliche Begriff „Seilsäge“. Sägen ist nach DIN 8589 Teil 6 definiert als Spanen mit kreisförmiger oder gerader Schnittbewegung, mit einem vielzahnigen Werkzeug von geringer Schnittbreite, wobei die Schnittbewegung vom Werkzeug ausgeführt wird.

Wie auch in Abschnitt 2.1.2.1 erläutert, handelt es sich beim Sägen immer um geometrisch bestimmte Schneiden. Beim „Seilsägen“ kommen jedoch keine geometrisch bestimmten Schneiden sondern geometrisch unbestimmte Schneiden zum Einsatz. Korrekterweise müsste deshalb von „Seilschleifen“ gesprochen werden und nicht von „Seilsägen“.

Jedoch hat diese Terminologie weite Verbreitung in der Praxis beziehungsweise in der Industrie gefunden [17]. Aufgrund dieser Tatsache wird in dieser Arbeit ebenfalls der Begriff „Seilsägen“ verwendet.

2.3 Funktionsweise einer Seilsäge

Eine Seilsäge muss zum einen das Diamantseil auf eine gewünschte Geschwindigkeit beschleunigen und zum anderen muss sie die Seilspannung während des Schnittes aufrechterhalten können, um funktionsfähig zu sein.

Ein mit Diamantsegmenten besetztes Seil wird um das zu trennende Werkstück gelegt und mit einem Zylinder an dieses gepresst. Der Aufbau solcher Diamantsegmente bzw. des

gesamten Diamantseils wird in Abschnitt 2.8.1 genauer betrachtet. Ein Motor beschleunigt durch eine verbundene Antriebsrolle das Diamantseil. Durch die Bewegung des Diamantseils und die eingebrachte Seilspannung kommt es an den Kontaktstellen zwischen dem Diamantseil, also dem Werkzeug, und dem Werkstück zu einem Materialabtrag.

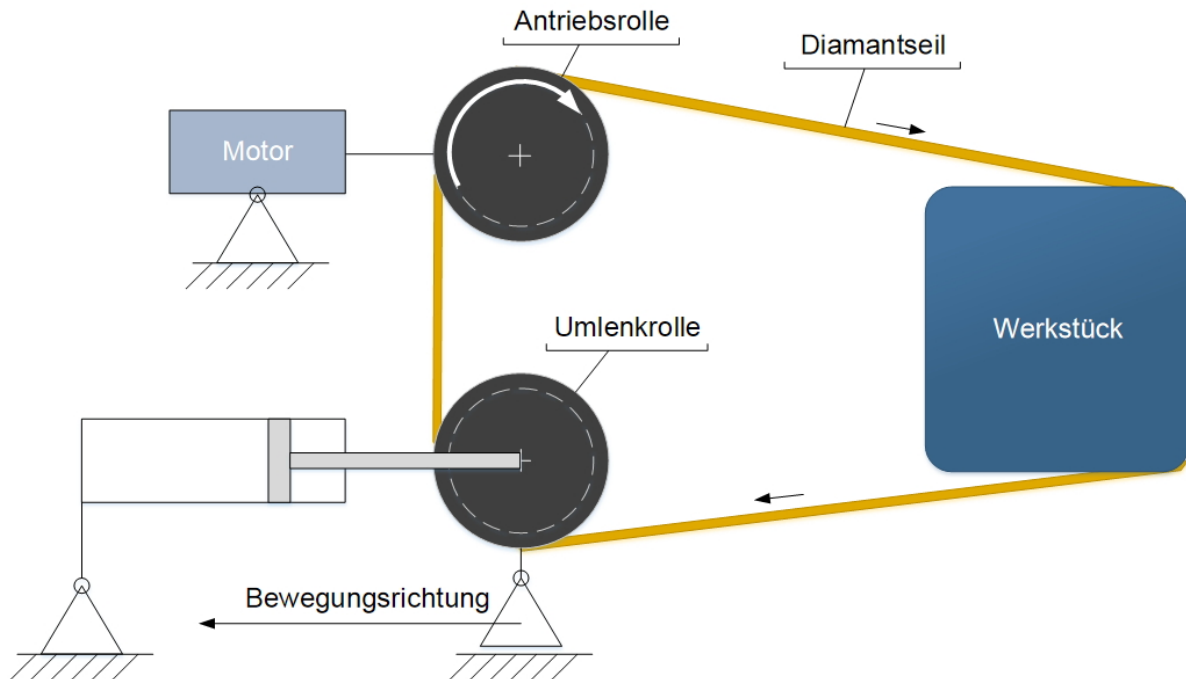


Abbildung 4: Funktionsweise einer Seilsäge

Um das Diamantseil auf eine gewünschte Geschwindigkeit von 20 m/s zu bringen, wird ein Antrieb benötigt. Dieser Antrieb erfolgt meist über einen elektrischen Motor, der mit einer Antriebsrolle verbunden ist. Als Motor können auch Hydraulikmotoren oder Verbrennungsmotoren zum Einsatz kommen. Die Antriebsrolle beschleunigt kraftschlüssig das Diamantseil auf die gewünschte Geschwindigkeit, wobei ein gewisser Schlupf entstehen kann. Um diesen Schlupf zu vermeiden, wird das Diamantseil in größtmöglicher Eingriffslänge um die Antriebsrolle gelegt. Dadurch wird sichergestellt, dass immer ausreichend Traktion zwischen Diamantseil und Antriebsrolle vorhanden ist. In der Praxis wird dies meist durch ein im Vergleich zu den Umlenkrollen größeres Antriebsrad realisiert. Bei mobilen Maschinen ist der Antrieb meist durch zwei Antriebsrollen, die jeweils mit zwei Elektromotoren verbunden sind, gelöst. Das Diamantseil umschlingt die beiden Antriebsrollen in Form einer Acht und vermeidet so den Schlupf, obwohl nur kleine Antriebsrollen im Einsatz sind.

Um die Seilspannung auch während des Schnittes immer konstant zu halten, wird eine Umlenkrolle, die mit einem Pneumatikzylinder verbunden ist, dem Werkstück entgegen geführt. Die Seilspannung gibt somit den Vorschub vor, mit dem das Werkstück getrennt wird. Dieser Vorschub ist notwendig, da sonst mit fortschreitendem Schnittverlauf die Spannung, die auf das Werkstück wirkt, nachlässt und letztendlich der Schnittfortschritt irgendwann zum Erliegen kommt. Je nach Länge des Schnittes muss der Vorschub, falls er nicht mehr ausreichend aufgebracht werden kann, neu eingestellt werden. Dies erfolgt entweder durch ein kürzeres Diamantseil oder durch eine Umpositionierung der Antriebseinheit.

Vor allem im Baubereich kommen Maschinen zum Einsatz, die zum größten Teil einen Seilspeicher haben, um großvolumige Werkstücke im Hoch- und Tief- oder im Straßenbau zu bearbeiten [18]. Diese Seilspeicher werden dadurch realisiert, dass das geschlossene Seil um mehrere Umlenkrollen geführt wird, die auf zwei beziehungsweise mehreren Achsen angeordnet sind und nach dem Prinzip des umgekehrten Flaschenzuges funktionieren. Das Seil wird hierbei während des Trennprozesses in den Seilspeicher eingezogen und somit durch das zu bearbeitende Werkstück geführt [19]. Neben diesen Seilspeichern sind, vor allem in den Steinbrüchen, auch Schienensysteme weit verbreitet. Um die Seilspannung aufrechtzuerhalten, wird die komplette Seilsäge auf eine Schiene gesetzt, die während des Trennprozesses langsam vom Werkstück weg bewegt wird. Dies ermöglicht eine kompaktere Maschine, da kein Seilspeicher benötigt wird. Die Schiene stellt somit die Vorschubeinheit dar.

Das Diamantseil wird über Umlenkrollen zum Werkstück geführt und umgelenkt. Da das Seil rundum mit Schneidkörnern belegt ist und in jede Richtung schneidet, sind auch die Führungs- und Umlenkrollen der Maschine dem Kontakt mit den Schneidkörnern ausgesetzt. Durch die Verwendung gummierter Führungsnuten, in denen das Diamantseil läuft, wird zum einen das Seil schonend umgelenkt, zum anderen eine Beschädigung der Rollen vermieden. Der Gummibelag der Führungsnut, in der das Diamantseil auf den Umlenkrollen läuft, unterliegt einer stetigen Abrasion. Allerdings dringen die Diamanten nur in den Gummibelag ein und durch die Möglichkeit des freien Drehens der Umlenkrolle kommt es beinahe zu keinem Verschleiß. Die Diamanten verlassen den Gummibelag wieder an der gleichen Stelle, an der sie eingedrungen sind, so dass sie zum nur im elastischen Bereich beansprucht werden. So sind sehr lange Standzeiten der Gummirollen bis etwa 1.000 Betriebsstunden möglich. Diese Zeiten werden jedoch nur erreicht, wenn keine Relativbewegung zwischen Diamantseil und Umlenkrolle vorliegt. Zu beachten ist, dass die Standzeit dieser Umlenkrollen je nach eingesetzter Segmentierung des Diamantseils, Werkzeugzustand und -art, der Gummialterung sowie der eingesetzten Seilspannung variieren kann.

Bei großem Umschlingungswinkel der Rolle durch das Diamantseil wirken folgende Faktoren dem Schlupf und der Abnutzung entgegen: die große Auflagefläche und die mit größerem Umschlingungswinkel steigende Anpresskraft des Diamantseils an die Umlenkrolle. Die Umlenkrollen werden vom Diamantseil soweit umschlungen, dass der Rollenbelag hier nur wenig abgenutzt wird [18].

Aufgrund starker Hitzeentwicklung an der Schnittfläche während des Trennprozesses sollte das Diamantseil mit Wasser gekühlt werden. Dies wird meist mit einer Wasserzuführung direkt vor dem Schnittbereich realisiert. Wie Untersuchungen bereits belegt haben, kann mit einer effektiven Kühlung die Standzeit des Diamantseiles stark erhöht werden [20][21].

2.4 Vor- und Nachteile der Seilsägetechnologie

Die Seilsägetechnologie besitzt, wie jede Art von Trenntechnik, verschiedene Vor- und Nachteile. In Tabelle 1 sind die wesentlichen Vor- und Nachteile der Seilsägetechnologie aufgelistet.

Nachfolgend werden die verschiedenen Vor- und Nachteile erläutert, wobei mit den Nachteilen begonnen wird. Das Stahlseil besitzt, aufgrund von Festigkeitsvoraussetzungen, und damit es während des Betriebs nicht reißt, einen Durchmesser von mindestens 7 mm.

Dadurch bedingt ist der Durchmesser der aufgebrauchten Diamantsegmente im Durchmesser mindestens genau so groß. In den meisten Fällen bewegt sich dieser Durchmesser der Segmente bei ca. 12 mm. Die Durchmesser der Diamantsegmente bestimmen die nach dem Trennprozess erzeugte Schnittfugenbreite. Somit ergibt sich beispielsweise, bei einer zu trennenden Fläche von 1 m² Stahl ($\rho = 7,85 \text{ kg/dm}^3$), Späne mit einem Gesamtgewicht von 94,2 kg.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der Seilsägetechnologie

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Flexibilität in der Anwendung • Keine Einschränkung in Schnitttiefe und Form des Werkstücks • Hohe Schnittleistung • Alle Materialien trennbar • Geringer Bedarf an Antriebsleistung • Kein Überschritt • Hohe Genauigkeit in Schnittführung durch Umlenkrollen • Mobile Maschinen haben geringe Rüstzeiten, Gewicht und Abmessungen • Geringe Lärmemission • Geringe Wärmeentwicklung, da Vielzahl von Schneidkörpern • Wenig Erschütterungen in Umgebung • Geringer Personalaufwand • Einfache Handhabung • Fernhantierbar während Betrieb 	<ul style="list-style-type: none"> • Große Schnittfugenbreite • Teilweise ungerade bzw. raue Schnittfläche • Geringe Oberflächengüte • Hohe Verletzungsgefahr durch Werkzeugrisse • Teilweise Vorbereitung durch Bohrungen am Werkstück notwendig • Hohe Werkzeugkosten • Hoher Werkzeugverschleiß • Hoher Anteil an Sekundärabfall (Staub und Wasser)

Bedingt durch den Kurvenverlauf des Diamantseils über der Eingriffslänge ergeben sich kleinere Riefen auf der Oberfläche des Werkstücks, was zu einer geringen Oberflächengüte führt. Bei geringem Vorschub und hoher Geschwindigkeit entsteht bei zu trennendem Stahl eine für das Verfahren relativ „gute“ Oberflächenqualität; das bedeutet, dass die Rauheit bei kleiner als ca. 0,5 mm liegt. Für inhomogene Materialien, wie beispielsweise Beton, liegt die Rauheit bei größer als ca. 0,5 mm. Unter hohem Vorschub und niedriger Schnittgeschwindigkeit kann hier die Rauheit mehrere Millimeter betragen. Beispielsweise bei Stahlbeton versucht das Diamantseil den, im Vergleich zu Beton schwerer zu trennenden Bewehrungsstahl, je nach Anordnung, zu „umgehen“. Daraus können mehrere Zentimeter Abweichung entstehen. Hier spielt ebenfalls die Eingriffslänge eine Rolle. Je weiter die Umlenkrollen vom Werkstück entfernt liegen, desto rauer wird die Oberfläche, da das Diamantseil durch Schwingungen mehr Auslenkung besitzt, was ein Verlaufen des Diamantseils begünstigt.

Die immer wieder auftretenden Werkzeugrisse stellen eine große Gefahr für die in der Nähe arbeitenden Menschen dar. Es wird empfohlen, die zweifache Länge der freien Diamantseillänge als Abstand einzuhalten [22]. Ein vorgespanntes Diamantseil, das sich mit beispielsweise 20 m/s bewegt, löst bei einem Seilriss mit den plötzlich frei werdenden Seilenden einen Peitscheneffekt aus. Aus sicherheitstechnischer Betrachtung sollte das Ziel sein, so wenig wie möglich freie Seillänge bei einer Anordnung zu erzeugen. Anhand von Einhausungen um das Diamantseil kann die freie Seillänge reduziert werden.

Je nach Verfahrensordnung sind für den Einsatz einer Seilsäge vorbereitende Maßnahmen in Form von Bohrungen am Werkstück zu tätigen, um das Diamantseil hindurchführen zu können, so dass ein geschlossener Kreis gebildet werden kann. Ebenfalls müssen für die Böcke, auf denen die Umlenkrollen gelagert werden, geeignete Orte für Befestigungsbohrungen gefunden und durchgeführt werden.

Größter Nachteil für die Seilsägetechnologie sind die hohen Werkzeugkosten. Bedingt durch die aufwendige Werkzeugherstellung und den hohen Anschaffungspreis von Diamanten sind die Diamantseile ein relativ teures Werkzeug. Hinzu kommt, dass selbst bei kleineren Schnitten, bedingt durch die Maschinenmindestbelegung, ein mehrere Meter langes Diamantseil benutzt werden muss. Zusätzlich hat der teilweise hohe Verschleiß negative Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der Seilsägetechnologie.

Gerade bei der Anwendung in kontaminierten Bereichen ist darauf zu achten, dass wenig Sekundärabfall entsteht, da dieser zu hohen Entsorgungskosten führt. Aufgrund der hohen Schnittfugenbreite entsteht jedoch eine große Menge an kontaminiertem Staub und je nach Einsatz durch die Kühlung auch eine große Menge kontaminiertes Wasser. Der Staub beispielsweise muss durch eine Absaugung vor einem Entweichen in die Umwelt gehindert werden [7].

Nach den aufgezählten Nachteilen werden im Folgenden die Vorteile genauer erläutert. Einer der größten Vorteile der Seilsägetechnologie liegt in der Möglichkeit der flexiblen Seilführung. Nahezu alle Formen und jede Geometrie können getrennt werden. Es gibt keinerlei Einschränkungen in der Schnitttiefe. Mit genügend Seillänge und Antriebskraft sind keinerlei Grenzen gesetzt, weshalb gerade bei großvolumigen Werkstücken aufgrund mangelnder Alternativen die Seilsäge eingesetzt wird.

Aufgrund der großvolumigen Schnitte ergibt sich auch eine hohe Schnittleistung. Je größer der Schnitt, desto besser ist die Leistung im Vergleich zu anderen Trennverfahren.

Da Diamanten die höchste bekannte Härte besitzen, sind prinzipiell alle Materialien mit mehr oder weniger Aufwand trennbar. Um die maximale Schnittleistung zu erreichen, muss natürlich die Seilsägetechnologie in der Anwendung auf das Material abgestimmt werden. Es gibt jedoch kein Material, das nicht getrennt werden könnte.

Die benötigte Antriebsleistung, um das Diamantseil zu beschleunigen, ist im Vergleich zu anderen Verfahren eher als gering einzuordnen und hängt hauptsächlich von der Eingriffslänge im Werkstück ab. Eine vergleichbare Wandsäge besitzt eine Motorleistung von 32 kW, während die Seilsäge vom gleichen Hersteller mit einer Motorleistung von 15 kW auskommt. Das System regelt sich selbst nach, d.h. bei geringeren Eingriffslängen wird auch weniger Leistung von den Antriebsaggregaten benötigt.

Mit der Seilsägetechnologie wird kein Überschnitt erzeugt. Aufgrund der flexiblen Seilführung wird immer nur dort geschnitten, wo auch geschnitten werden soll. Beispielsweise bei Kreissägen wird mit dem Sägeblatt oft an Stellen geschnitten, die nicht getrennt werden sollten, um beispielsweise eine gewisse Tiefe sicherzustellen. Grund hierfür ist die starre Form des Werkzeugs, die bei einem Schnitt mit dem flexiblen Diamantseil kein Problem darstellt. In diesem Zuge ist auch die relativ hohe Genauigkeit der Schnittführung zu nennen. Durch die Umlenkrollen kann genau dort geschnitten werden, wo geschnitten werden soll.

Die Rüstzeiten fallen bei einem Einsatz einer mobilen Seilsäge ebenfalls gering aus. Aufgrund der kleinen handlichen Geräte sind die Voraussetzungen für einen Trennprozess, bei abgeschlossenen Vorbereitungsmaßnahmen wie beispielsweise Bohrungen zur Befestigung der Umlenkrollen, in wenigen Minuten geschaffen. Die Flexibilität des Diamantseils erlaubt es, die Maschine an einem frei wählbaren Ort aufzustellen. Durch den einfachen Aufbau haben mobile Maschinen ein geringes Gewicht und kompakte Abmessungen. Die meisten Maschinen sind so ausgelegt, dass sie durch jede Türöffnung befördert werden können.

Die Schallemissionen während des Trennprozesses sind im Vergleich zu anderen Trennverfahren als gering anzusehen. Der Schalldruckpegel erreicht nicht mehr als 80 dB(A) [23], was ungefähr dem Fahrgeräusch eines normalen PKW entspricht, der in einem Meter Entfernung mit 50 km/h vorbeifährt.

Die Wärmeentwicklung der einzelnen Schneidkörper kann bei geringen Eingriffslängen im Vergleich zu anderen Trennverfahren aufgrund der Länge des Diamantseils vernachlässigt werden. Je länger das Diamantseil, desto mehr Zeit haben die Diamantsegmente, um sich abzukühlen. Wenn größere Eingriffslängen vorhanden sind sollte eine Kühlung zum Einsatz kommen. Durch diesen Umstand sind auch Trockenschnitte möglich, weshalb sie auch in kerntechnischen Anlagen, in denen Sekundärabfall wie Wasser vermieden werden sollte, einsetzbar sind [24][25]. Wie in Abbildung 6 ersichtlich, besitzt das Diamantseil nach Schnittende nur eine Temperatur von ca. 25,6 °C. Während dem Schnitt sind die Lager der Umlenkrollen mit ca. 58 °C mehr als doppelt so warm.

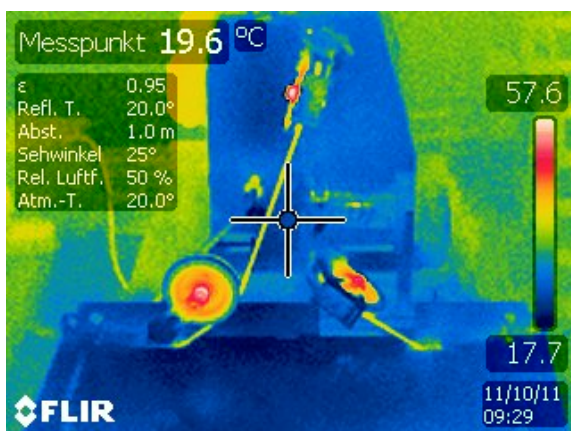


Abbildung 5: Thermografieaufnahme während Trennvorgang

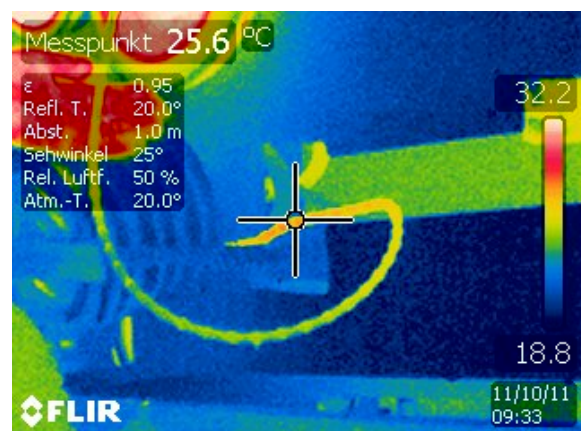


Abbildung 6: Thermografieaufnahme des Diamantseils kurz nach Schnittende

Vor allem im Bau- und Abbruchbereich sind die geringen Erschütterungen, die durch die Seilsäge produziert werden, ein Vorteil. Gerade bei in der Nähe stehenden Gebäuden, die erhalten bleiben sollen, muss darauf geachtet werden, dass diese keine Beschädigungen durch angrenzende Arbeiten erfahren.

Eine Seilsäge ist einfach handhabbar und benötigt nur einen Bediener. Da bei mobilen Maschinen das Steuerpult von der Seilsäge entfernt aufgestellt werden kann, ergibt sich ein weiterer Vorteil. So können beispielsweise in sicherheitstechnischen Bereichen, wie sie in kerntechnischen Anlagen vorzufinden sind, Arbeiten fernhantiert durchgeführt werden. Lediglich zum Auf- und Abbau der Maschine muss kurzzeitig in diesen Bereichen gearbeitet werden.

Die Seilsägetechnologie besitzt viele spezifische Vorteile, die in der richtigen Anwendung, wie beispielweise dem Trennen großvolumiger Werkstücke, keinerlei wirtschaftliche Alternativen zulässt. Jedoch muss sich der Anwender beim Einsatz einer Seilsäge der Gefahren bewusst sein und die hohen Werkzeugkosten akzeptieren.

2.5 Anwendungsgebiete

Das Seilsägeverfahren mit Diamantseilen als Werkzeug findet sich in einer Vielzahl von Anwendungsgebieten wieder. Der Ursprung der Seilsägetechnologie liegt in der Natursteinbearbeitung und stellt dadurch auch das Hauptanwendungsgebiet dar. Neben der Anwendung in der Natursteinindustrie kann allgemein gesagt werden, dass es sich, falls eine Seilsäge zur Anwendung kommt, meistens um eine Anwendung mit nicht reproduzierbarer Konstellation handelt.

2.5.1 Natursteingewinnung

Die Technik der Diamantseilsäge stellt die Haupttrenntechnologie bei der Gewinnung von Marmor, Kalkstein, Sandstein, Travertin sowie Granit dar [26][27]. Abbildung 7 zeigt den Produktionszyklus für einen Granitsteinbruch.

In den meisten Granitsteinbrüchen sind die Hauptblöcke kubisch oder rechteckig und besitzen ein Volumen von einigen 100 m³ bis zu 4.000 m³ [29][30]. Allein durch die Verwendung von Diamantseilsägen beim Hauptschnitt konnte die Gewinnungsrate von Steinmaterial um 100 % erhöht werden [28]. Größter Vorteil gegenüber den ehemals eingesetzten Verfahren ist die wirtschaftliche Bearbeitung der Blöcke anstelle einer unkontrollierten Extraktion. Die daraus gewonnen Blöcke haben eine maximale Länge von 3,5 m und eine maximale Höhe von 2 m [31].

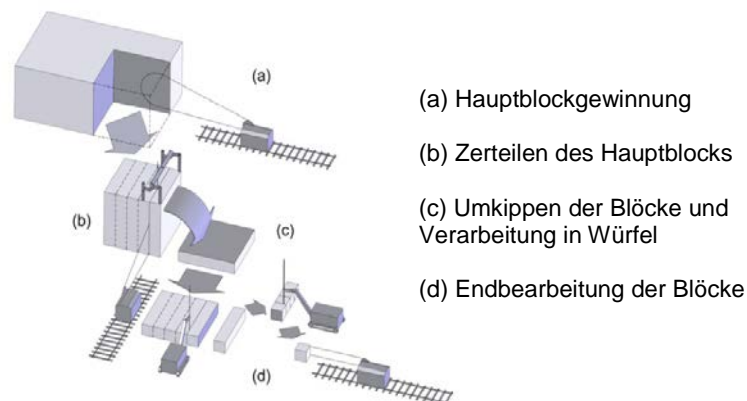


Abbildung 7: Produktionszyklus im Steinbruch [28]

Die Endbearbeitung der Blöcke wird in immer mehr Steinbrüchen, um Transportkosten zu sparen und um den Wert der Blöcke zu erhöhen, mit der Seilsäge durchgeführt [28]. Des Weiteren werden die Natursteinblöcke mittels Seilsägeverfahren an den Ober- und Seitenflächen bearbeitet, um einen guten Anschnitt der konventionellen Werkzeuge, wie Gatter- und Kreissägeverfahren, bei unregelmäßigen Oberflächen der Blöcke zu gewährleisten [32][33]. Abbildung 9 zeigt eine stationäre Seilsäge, die die gewonnenen Blöcke in Scheiben schneidet.



Abbildung 8: Zerteilen des Hauptblocks



Abbildung 9: Scheibenschneiden der Endblöcke

Die Zerlegung der Natursteinblöcke zu Rohplatten wird mit sogenannten Multi-Seilsäge-Maschinen durchgeführt. Mit diesen Maschinen ist es möglich, bis zu 72 Rohplatten gleichzeitig in unterschiedlicher Dicke zu schneiden. Diese Art von Verfahren benötigt weitaus weniger Zeit als die Platten nacheinander einzeln zu sägen. Ebenfalls können Marmor- und Granitblöcke verschiedener Größe bearbeitet werden [31][34][35].

Ein weiterer Anwendungsfall in der Natursteinbearbeitung ist die Konturbearbeitung. Die Seilsägetechnologie ermöglicht es heute, durch den Einsatz von Computerized Numerical Control (CNC) dreidimensionale Konturen aus einem Block zu schneiden. Dadurch sind selbst komplexe dreidimensionale Strukturen, wie Treppen oder konische Säulen, herstellbar [31][37].



Abbildung 10: Konturschnitt an barockem Grabkreuz [36]



Abbildung 11: Profilierung eines Pfeilerabdeckers [36]

2.5.2 Bauindustrie

Die Seilsägetechnologie erhält seit ihrer Markteinführung Anfang der 80er Jahre mehr und mehr Bedeutung in der Bauindustrie. Vor allem bei großvolumigen Trennarbeiten ist die Seilsäge eine oft eingesetzte Technik [38]. Meist ist sie ab einer Trenntiefe von ungefähr 50 cm, gegenüber anderen Verfahren, wirtschaftlich [39]. Oft wird in der Praxis aber auch erst ab einer Tiefe von 80 cm eine Diamantseilsäge eingesetzt. Große Vorteile im Baubereich sind die einfache Montage, die kurzen Rüstzeiten und die hohe Flexibilität in der Anwendung.

Häufig anzutreffen sind die Kreisseilsägen, die für das Erstellen von runden Öffnungen von 1 m bis 6 m verwendet werden. Wendeltreppendurchbrüche können mit der Kreisseilsäge auf einfache Weise hergestellt werden. Neben der Herstellung von runden Öffnungen wird

die Seilsäge auch für die Herstellung von Ausschnitten für Fenster und Türen in betonierten oder gemauerten Wänden verwendet [40][41].

Ferner wird die Seilsäge bei der Trockenlegung von meist feuchten Kellerwänden eingesetzt. Um die Wand trockenzulegen, wird nachdem Durchgangsbohrungen um das Diamantseil hindurchzuführen zu können erstellt worden sind, mit Hilfe einer Seilsäge abschnittsweise eine waagrechte Fuge in das Mauerwerk geschnitten, in die später eine Horizontalabdichtung eingelegt wird. Dadurch wird der Transport von Wasser im Bauwerk durch eine mechanische Sperre unterbrochen und bleibt somit trocken [42][43].

Ein weiteres Anwendungsfeld ist das nachträgliche Einbringen einer Trennfuge zwischen Doppel- oder Reihenhäusern, bei denen Trennfugen schlecht oder nicht ausgeführt sind, oder eine feste Verbindung zwischen den Bauwerken besteht, um diese aus Schallschutzgründen komplett voneinander zu entkoppeln [44][45][46].

2.5.3 Abbruch und Rückbau

Als letztes großes Anwendungsgebiet für die Seilsäge sind Abbruch- und Rückbauarbeiten zu nennen. So werden beispielsweise große Kaminschornsteine abgebaut oder Straßenbrücken mit der Seilsäge abgebrochen [47][48][49]. Aber auch beim Einsatz in U-Bahnschächten findet die Seilsäge ihre Anwendung [50][51]. Zu den Materialien, die abgebrochen werden, zählen vor allem Mauerwerk, Beton und Stahlbeton. Oft kommt die Seilsägetechnologie auch beim Abbruch von Fundamenten zum Einsatz [52]. So werden auch die Fundamente von Offshore-Windparks unter Wasser mit der Seilsägetechnologie getrennt [53].

Des Weiteren findet die Seilsäge im maritimen Umfeld noch andere Anwendung. Neben dem Unterwasserschneiden von Pipelines wird das Seilsägen auch dazu verwendet, um Schiffswracks zu teilen, um diese besser bergen zu können [54]. Beispiele hierfür stellt die Bergung des Autotransporters Tricolor oder des russischen Unterseeboots Kursk dar [5]. Aber auch an Land werden mittels Seilsägetechnologie komplette Schiffswracks getrennt.

Beim Zerlegen von Anlagenbauteilen wird ebenfalls Stahl getrennt. Der Vorteil der Seilsägetechnologie besteht vor allem in der Unabhängigkeit von Größe und Material des Werkstücks. Wie Abbildung 14 zeigt, sind auch etwas unkonventionelle Anwendungsarten für die Seilsäge möglich, so kann beispielsweise ein komplettes Auto der Länge nach zerteilt werden oder auch Tresore können dem Diamantseil nicht standhalten [55].

Ein immer mehr an Bedeutung gewinnendes Anwendungsgebiet ist der Rückbau von kerntechnischen Anlagen. Ein wichtiger Gesichtspunkt bei Trennverfahren, die für die Stilllegung kerntechnischer Anlagen und hierbei insbesondere für hochaktivierte Bauteile eingesetzt werden sollen, ist die Anwendbarkeit unter Wasser. Die Zerlegung der Reaktoreinbauten erfordert in den meisten Fällen aus Strahlenschutzgründen das Arbeiten unter der abschirmenden Wirkung des Wassers. Aus diesem Grund mussten viele Techniken, die in handelsüblicher Anwendung nur für den Einsatz an Luft geeignet sind, entsprechend adaptiert werden [7][56].



Abbildung 12: Schiffsheck umschlungen von Diamantseil



Abbildung 13: Abgetrenntes Schiffsheck



Abbildung 14: Komplettes Fahrzeug der Länge nach aufgeschnitten

Gegenüber anderen Trennverfahren bietet die Seilsägetechnologie mit Diamantseilen wesentliche Vorteile. Benötigt werden nur geringe Rüstzeiten, die auch von dem hohen Maß an Mobilität der Säge profitieren. Ist die Seilsäge einmal installiert, kann sie selbstständig das Werkstück durchtrennen. Der Aufenthalt ist nur kurzzeitig, um die Seilsäge auf- oder abzubauen. Die Steuerpulte zur Bedienung der Seilsäge können auch weit entfernt außerhalb des Sicherheitsbereiches aufgestellt werden. Zusätzlich ist die vor allem im kerntechnischen Bereich benötigte Gewissheit, dass das Werkstück tatsächlich durchtrennt wurde, bei jedem Schnitt gegeben. Da das Diamantseil einen geschlossenen Kreis darstellt, können keine Stellen ausgelassen werden, was in einer hohen Prozesssicherheit resultiert. Bei anderen Verfahren ist diese Prozesssicherheit mitunter nicht gegeben.

Nachteilig sind die relativ hohen Schnittbreiten von ca. 12 mm und die damit anfallenden großen Mengen an freigesetzten Aerosolen, die vor allem beim Rückbau von kerntechnischen Anlagen beim Schnitt von kontaminierten Werkstücken besonders beachtet werden müssen. Die Aerosole mit Wasser zu binden ist in kerntechnischen Anlagen nicht möglich, da dadurch Sekundärabfall in Form von Wasser entsteht. Diesen Sekundärabfall gilt es zu vermeiden, weshalb um eine Kontaminationsverschleppung zu verhindern, diese freigesetzten Stäube durch spezielle Absaugvorrichtungen aufgefangen werden müssen [57].

Ebenfalls kann die Seilsägetechnologie bei der Zerlegung des Bioschildes zum Einsatz kommen [58]. Der Bioschild besteht aus Schutzbeton, der ionisierende Strahlung aus dem

Reaktorkern abschirmt und, um seine Funktion zu erfüllen, sehr großvolumig konstruiert wird.

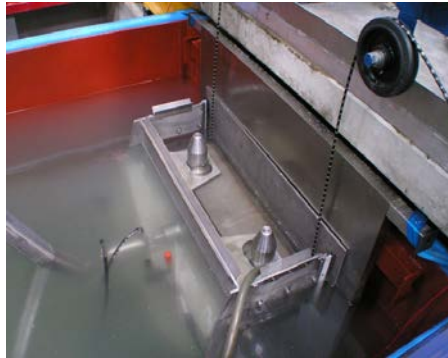


Abbildung 15: Vorversuch zum Abtrennen einer Edelstahlkonsole, die sich identisch im Kernkraftwerk befindet

Gerade im kerntechnischen Umfeld werden vor dem Einsatz im Kernkraftwerk Vorversuche mit realitätsnahen Bedingungen durchgeführt, um sicherzustellen, dass es später vor Ort zu keinen unerwarteten Komplikationen kommt. Abbildung 15 zeigt einen solchen Vorversuch, der in der Werkstatt des Instituts für Technologie und Management im Baubetrieb an dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) durchgeführt wurde.

2.6 Anwendungsarten

Die Anwendung der Seilsägetechnologie lässt sich in zwei Verfahrensabläufe unterscheiden. Dem „Umschlingenden Verfahren“ und dem „Tiefenschnittverfahren“. Diese beiden Verfahrensabläufe werden im Folgenden betrachtet.

2.6.1 Umschlingendes Verfahren

Beim umschlingenden Verfahren wird das Diamantseil um die Außenkanten des zu bearbeitenden Werkstücks gelegt und umschließt es somit komplett. In der Praxis ist dies das hauptsächlich eingesetzte Verfahren. Abbildung 16 zeigt einen solchen typischen Anwendungsfall für dieses Verfahren.

Oftmals müssen hierzu aufgrund der Werkstückgeometrie an verdeckten Kanten, zuerst Durchgänge in Form von Bohrungen geschaffen werden, durch die dann das Diamantseil hindurchgeführt werden kann. In dem in Abbildung 16 dargestellten Verfahrensablauf wird die benötigte Vorschubkraft mittels eines Schienensystems aufgebracht.

Das geschlossene Diamantseil schneidet in diesem Verfahren also immer nach „innen“ in dem vom Diamantseil gebildeten Kreis, und zwar in die Richtung, in die die Vorschubkraft wirkt. Die Schnittrichtung kann aber natürlich durch Umlenkrollen entsprechend variiert werden. Während des Schnittes ist zu beobachten, dass das Diamantseil aufgrund der zu bearbeitenden Geometrie entsprechende Radien einstellt, die im späteren Schnittbild meist noch zu erkennen sind. Während des Trennprozesses ändert sich der Seilverlauf von der anfangs stark kantigen Fläche zu einem abgerundeten Kurvenverlauf mit einer gleichmäßigen Krümmung. Außer an den Ein- und Auslasspunkten, die durch Umlenkrollen vorgegeben werden, erreicht das Schnittprofil nahezu eine Kreisform. Das Diamantseil wird zuerst an der Stelle schneiden, an der sich die größte Winkeldifferenz zwischen den auf dem

Diamantseil aufgebrachtene Diamantsegmenten und dem Werkstück ergibt. Das Schnittbild verläuft deshalb immer in runden Kreisbahnen.

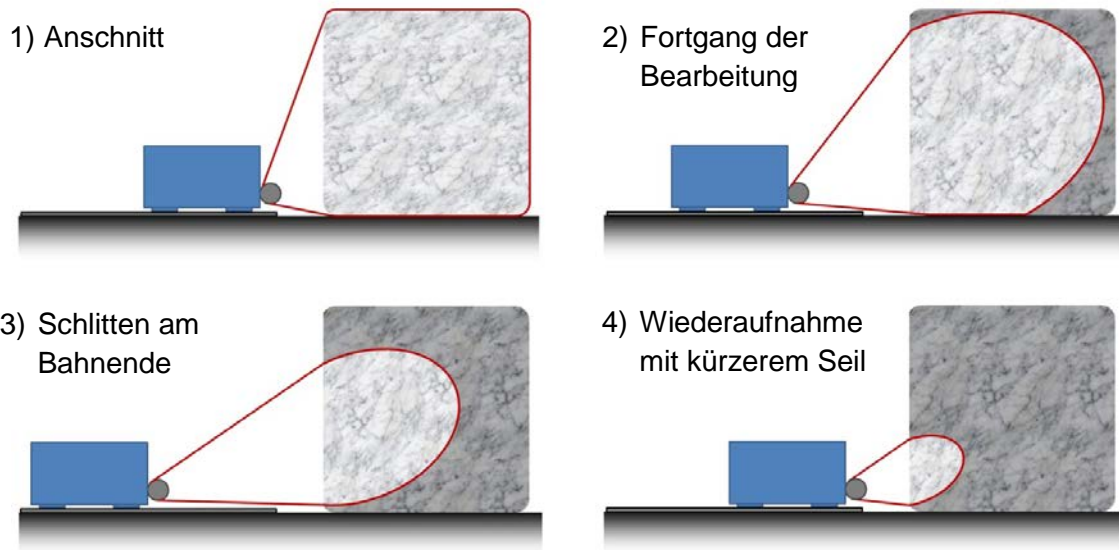


Abbildung 16: Umschlingendes Verfahren

2.6.2 Tiefschnittverfahren

Beim Verfahren „Tiefschnitt“ ist, anders als beim umschlingenden Verfahren, bei dem das Diamantseil komplett um das Werkstück gelegt werden muss, nur ein bedingter Zugang zum zu trennenden Werkstück erforderlich.

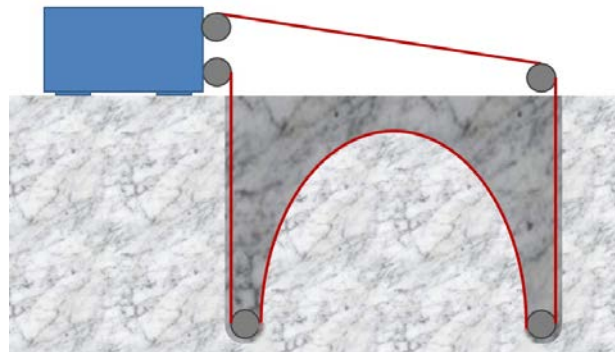


Abbildung 17: Tiefschnitt mit Sacklöchern

Abbildung 17 zeigt einen solchen Tiefschnitt. Als vorbereitende Maßnahme müssen jeweils zwei Bohrungen gesetzt werden, in die die Umlenkrollen hinabgelassen werden können. Bei diesem Verfahren wird durch die Umlenkrollen die Tiefe des Schnittes bestimmt. Das Diamantseil schneidet nur bis auf die Höhe der tiefsten gedachten tangentialen Verbindung beider Umlenkrollen. Der Schnitt führt bei diesem Verfahren nicht nach „innen“, sondern nach „außen“ in die Richtung des vom Diamantseil umschlossenen Querschnitts hinaus. Vorteil dieses Verfahrens ist die Möglichkeit, bei nur einer frei zugänglichen Oberfläche in die Tiefe zu schneiden, beziehungsweise in das Werkstück „einzutauchen“. Voraussetzung sind jedoch die Bohrungen für die Umlenkrollen.

Ebenfalls muss bei diesem Verfahren beachtet werden, dass sich die anfallenden Späne bei den unteren Umlenkrollen sammeln und entsprechend abtransportiert werden müssen, beispielsweise durch eine Absaugung. Als Schnittbild stellen sich nach unten geöffnete symmetrische Parabeln beziehungsweise elliptische Kreisabschnitte ein, die mit zunehmender Tiefe immer flacher werden. Dieses Verfahren findet vor allem bei stationären Seilsägen Anwendung.

2.7 Maschinentechnik

Für jedes Anwendungsgebiet gibt es unterschiedliche Maschinenarten von Seilsägen. In der Natursteinbearbeitung kommen speziell für die Extraktion der Hauptblöcke gebaute Maschinen sowie stationäre Seilsägen für die Weiterverarbeitung der gewonnenen Blöcke zum Einsatz. Im Baubereich werden vor allem kompakte und mobile Maschinen benötigt, abhängig vom Anforderungsprofil an diese Seilsägen. In der Natursteinbearbeitung wiederholen sich die Prozessvorgänge meist mit marginalem Unterschied, was eine bessere Planbarkeit ermöglicht und somit stationäre Seilsägen begünstigt. Im Bau- und Abbruchbereich sind die Werkstücke meistens unterschiedlich in Material und Geometrie, so dass flexibel und individuell auf diese unterschiedlichen Situationen reagiert werden muss.

Die in Steinbrüchen eingesetzten Seilsägen verlaufen vorwiegend auf Schienen, die mit dem Boden verankert sind. Der beim Schnittfortschritt notwendige Vorschub des Diamantseils wird über die Linearbewegung des auf der Schiene geführten Antriebs ermöglicht [59]. Abbildung 18 zeigt eine solch übliche Seilsäge zur Natursteinextraktion.

Die Endbearbeitung der Natursteinblöcke erfolgt mittels stationärer Portalmaschinen, die nach dem Verfahren des Tiefschnittes funktionieren. Mit diesen Maschinen ist es laut aktuellem Stand der Technik möglich, bis zu 72 Rohplatten gleichzeitig in unterschiedlicher Dicke zu schneiden [35]. Abbildung 19 zeigt eine solche Multi-Seilsäge.



Abbildung 18: Schienengeführte Seilsäge [60] Abbildung 19: Multi-Seilsäge-Maschine [35]

Der beim Schnittfortschritt notwendige Vorschub des Diamantseils wird über eine vertikale Linearbewegung des Schlittens entlang einer stationären Führungsschiene ermöglicht. Jedoch wird bei Portalmaschinen diese Linearbewegung nicht horizontal ausgeführt, sondern läuft, um 90° gedreht, in der Vertikalen ab.

Ebenfalls im Bereich der Natursteinbearbeitung anzutreffen sind sogenannte Konturmaschinen. Dabei handelt es sich um Portalmaschinen, die auf einer bis zu fünffachsignen Aufhängung arbeitet. Die Achsen werden einzeln oder gleichzeitig mit Vorschüben geregelt und durch CNC-Technik angesteuert. Die CNC-Technik ermöglicht

einen dreidimensionalen Abtrag, mit dem komplizierte 3D-Konturen herausgeschnitten werden können.



Abbildung 20: Eine Kreisseilsäge im Einsatz [61]

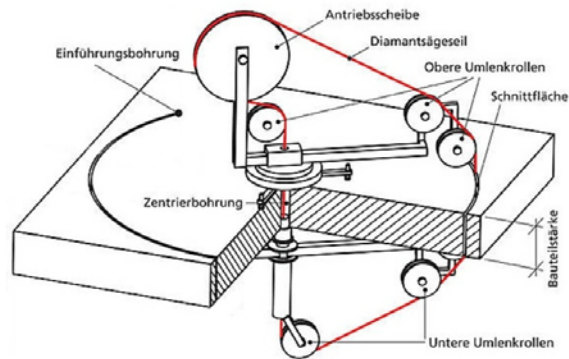


Abbildung 21: Schematische Darstellung Kreisseilsäge [61]

Für das nachträgliche Erstellen von runden Öffnungen werden im Baubereich häufig Kreisseilsägen verwendet. Abbildung 20 und Abbildung 21 zeigen eine solche Kreisseilsäge. Die Seilsäge wird auf einer Zentrierbohrung befestigt und das Diamantseil wird hindurchgeführt. Auf der gegenüber liegenden Seite wird das Diamantseil umgelenkt und durch die Schnittfuge wieder auf die andere Seite geführt. Über einen Drehteller wird die Seilsäge in eine Rotationsbewegung versetzt und als Schnittbild entsteht ein Kreis. Voraussetzung für den Einsatz einer Kreisseilsäge ist der freie Zugang zu beiden Seiten der Wand, da auf beiden Seiten Gestelle für die Umlenkrollen angebracht werden müssen.

Des Weiteren kommen im Baubereich vor allem mobile Seilsägen mit integriertem Seilspeicher zum Einsatz. Ihr Antrieb erfolgt entweder elektrisch, pneumatisch oder hydraulisch. Ein integrierter Seilspeicher zur Erzeugung des Vorschubs ist gegenüber einem Schienensystem erheblich platzsparender, da der Seilspeicher nach dem Prinzip des Flaschenzuges funktioniert und dadurch kein Schienensystem benötigt [18].

Das geschlossene Seil wird um mehrere Umlenkrollen geführt, die auf mindestens zwei Achsen angeordnet sind. Werden die beiden Achsen, auf denen das Diamantseil einmal umgelenkt wird, auseinander geführt, so verdoppelt sich die zurückgelegte Strecke, die das Diamantseil erfährt. Je nach Anzahl der Umlenkungen im Seilspeicher vervielfacht sich dieser Weg. Dies erlaubt den Einsatz von kleinen kompakten Maschinen, die jedoch eine große Menge an Diamantseil aufnehmen können.

2.8 Werkzeug

In diesem Abschnitt wird der Aufbau der Diamantseile näher betrachtet, es wird auf die verschiedenen Herstellungsarten der Diamantsegmente eingegangen, die Prozessgrößen, die auf das Diamantsegment wirken, werden aufgezeigt und erläutert. Der Kornwerkstoff Diamant sowie verschiedene Spanbildungsmechanismen werden genauer vorgestellt. Zum Schluss werden die Energieverteilung und der Verschleiß, der auf das Werkzeug wirkt, genauer erläutert.

Als Werkzeug kommt beim Seilsägen ein Stahlseil zum Einsatz, auf dem gebundene Diamanten aufgebracht werden. Seit ihrer Markteinführung wurde die Variante mit losem

Schneidkorn fast komplett verdrängt [1]. Die gebundenen Diamanten sind in perlenförmigen Schneidkörpern, sogenannten Schneidsegmenten, entlang des Seils angeordnet. Diamant hat sich aufgrund seines besseren Einsatzverhaltens bei Trennschleifprozessen gegenüber Stahlschrott, Korund, Quarzsand und Siliziumkarbid als Schneidstoff durchgesetzt [39][49][62]. Vorrangig verdankt der Diamant seinen Einsatz der größten bekannten Härte aller Schleifstoffe. Aufgrund seiner Härte besitzt er damit auch die höchste Verschleißfestigkeit [63].

2.8.1 Aufbau des Werkzeuges

Konventionelle Diamantseile haben immer einen ähnlichen Aufbau. Lediglich in der Herstellung der Diamantsegmente ergeben sich Unterschiede. Das Diamantseil besteht, wie auch in Abbildung 22 dargestellt, aus den nachfolgenden Einzelementen:

- **Grundträgerseil**
Das Grundträgerseil besteht zumeist aus korrosionsbeständigen Stahllitzen, die in der Bauart 7x7 oder 7x19 verwendet werden. Dies bedeutet, in dem Seil sind 7 Seilstränge, die wiederum aus jeweils 7 oder 19 Einzeldrähten hergestellt sind.
- **Segmente**
Die Segmente sind durch unterschiedliche Fertigungsverfahren mit Diamanten besetzt und bilden somit die Hauptkomponente für einen Abtrag. Die Segmente bestehen aus einem Stahl- oder Aluminiumgrundkörper, auf den die Diamanten aufgebracht werden und somit gebunden sind (siehe Abschnitt 2.8.2 Herstellungsarten für Diamantsegmente).
- **Klemmhülsen**
Um die Segmente auf dem Grundträgerseil zu fixieren, werden Klemmhülsen eingesetzt. In bestimmtem Abstand, der sich über mehrere Segmente erstreckt, werden die Hülsen mit dem Grundträgerseil verpresst.
- **Abstandsfedern**
Die Abstandsfedern werden zwischen die Diamantsegmente gelegt, um diese auf Distanz zu halten. Diese vorgespannten Federn ermöglichen es den Diamantsegmenten bei hohen Beanspruchungen, die durch den Trennprozess hervorgerufen werden, axial flexibel zu bleiben. Ohne die Abstandsfeder würden die Diamantsegmente sich schneller verkanten, was zu einem Riss des Grundträgerseils führt. Eine weitere Funktion der Abstandsfedern liegt im Schutz des Grundträgerseils vor dem Kontakt mit dem Werkstück, was sich positiv auf die Lebensdauer auswirkt.
- **Zwischenelemente**
Zwischen die Segmente wird Kunststoff oder Gummi gespritzt. Sie dienen zum Schutz der Abstandsfedern, der Klemmhülsen und des Grundträgerseils. Dies soll den Kontakt zum Werkstück erschweren und somit die Langlebigkeit des Seils erhöhen. Aus Fertigungsgründen werden meist nicht nur die Zwischenräume, sondern das komplette Diamantseil mit Kunststoff beziehungsweise Gummi überzogen. Beim ersten Schnitt befreien sich die Diamanten von dem Überzug.

- **Verbinder**

Die beiden freien Enden des Diamantseils werden miteinander verbunden um ein endloses Werkzeug zu erhalten. Dazu werden Verbinder auf die freien Enden des Grundträgerseils gepresst. Die Verbindung an sich kann durch verschiedene Systeme erfolgen. Entweder kommt sie durch starre beziehungsweise verschraubbare Elemente zustande oder sie erfolgt durch Kardangelenke mit Stift, eine Variante, bei der die Laufrichtung beachtet werden muss.

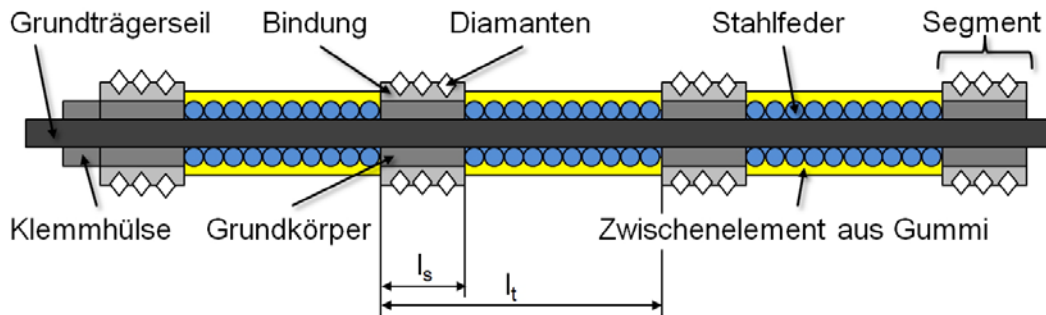


Abbildung 22: Schnittdarstellung zum Aufbau des Diamantseils

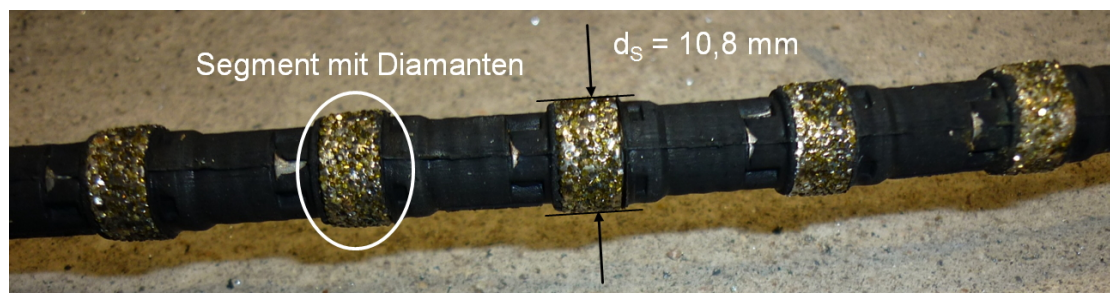


Abbildung 23: Detailbetrachtung Diamantseil

Die Länge des Segments l_s und der Abstand der Segmente l_t bestimmen die Segmentierung λ des Werkzeuges [64].

$$\lambda = \frac{l_s}{l_t} \quad (1)$$

Der Durchmesser d_s des Diamantseils bewegt sich bei den meisten auf dem Markt verfügbaren Modellen zwischen 10,5 mm und 12 mm [65]. Je größer der Durchmesser desto mehr Material muss beim Abtrag durch die Diamanten zerspant werden. Ein kleinerer Durchmesser wäre von Vorteil, jedoch muss das Diamantseil, um nicht zu reißen, die Kräfte beim Bearbeitungsprozess aufnehmen können. Mitunter kommt es vor, dass Diamantseile mit kleineren Durchmessern nachträglich eingebracht werden. Während des Schnitts verschleißt das Diamantseil und der Durchmesser nimmt stetig ab. Falls das Diamantseil nicht ausreichend ist, um den Schnitt vollständig durchzuführen, wird es gegen ein Diamantseil mit kleinerem Durchmesser getauscht, da dieses ohne zu Verkleben durch die bestehende Fuge passt und den Schnitt vollenden kann.

Falls das Diamantseil reißt, beispielsweise aufgrund von Verschleißerscheinungen, kommt es durch die Spannung zu einem Peitscheneffekt und das Seil schlägt bei einem Seilriss entsprechend aus. Das Diamantseil reißt, ähnlich einer Kette, an der schwächsten Stelle, die in den meisten Fällen der Verbinder darstellt. Als Sicherheitsabstand wird deshalb der doppelte Abstand der freien Seillänge empfohlen.

Des Weiteren wird das Seil je laufenden Meter Seillänge einmal in sich eingedreht, um einseitigen Verschleiß des Diamantseils vorzubeugen [22]. Dadurch soll erreicht werden, dass das Seil während des Umlaufs auch tangential rotiert, so dass die Segmente über den ganzen Umfang beansprucht werden und sich keine einseitige Abnutzung einstellt.

2.8.2 Herstellungsarten für Diamantsegmente

Der Schneidstoff Diamant kann grundsätzlich direkt oder indirekt mit dem Hauptträgerseil verbunden werden. Versuche von Werkzeugherstellern, die Hauptträgerseile direkt im galvanischen Prozess mit Diamanten zu belegen, zeigten, dass eine direkte Belegung nicht erfolgreich ist. Die Biegung des Hauptträgerseiles brachte die Bindungsschicht zum abplatzen [66].

Aus diesem Grunde verbleibt als Verbindung des Hauptträgerseils mit dem Schneidkorn die indirekte Belegung. Die Lösung für eine indirekte Belegung sind zylinderförmige Segmente, die zuerst mit Diamanten besetzt und danach mit dem Hauptträgerseil verbunden werden [67]. Die Segmente bestehen in der Regel aus Stahlgrundkörpern (C 45) mit zentrischer Bohrung für die Aufnahme des Grundträgerseils [1]. Abbildung 27 zeigt ein solches mit Diamanten besetztes Segment. Die Bindungsschicht muss den Diamanten ausreichend festhalten können, damit kein zusätzlicher oder erhöhter Verschleiß durch den Verlust ganzer Körner entsteht. Die Dicke der Bindungsschicht erweist sich als wichtiger Einstellungsfaktor. Bei zu geringer Dicke werden die Diamanten nicht ausreichend gehalten. Bei zu großer Dicke vermindert sich der Spanraum und folglich kommt es zu einem reduzierten Abtrag.

Im Folgenden werden die verschiedenen Herstellungsarten für die Diamantsegmente betrachtet.

2.8.2.1 Galvanische Bindung

Die diamanthaltige Schicht wird auf die Mantelfläche der Grundkörper in einer einzigen Schicht aufgebracht. Bei der galvanischen Beschichtung wird durch ein elektrolytisches Bad Strom geleitet. An der Anode befindet sich das Metall, das aufgebracht werden soll und an der Kathode der zu beschichtende Gegenstand. Als Metall für die Bindungsschicht wird überwiegend ein Nickel-Werkstoff benutzt. Der elektrische Strom löst Metallionen von der Verbrauchselektrode ab und lagert sie durch Reduktion auf dem Werkstück ab. So wird der zu veredelnde Gegenstand allseitig gleichmäßig mit einem ausgewählten Metall beschichtet. Je länger sich der Gegenstand im Bad befindet und je höher der elektrische Strom ist, desto stärker wird die Metallschicht [68].

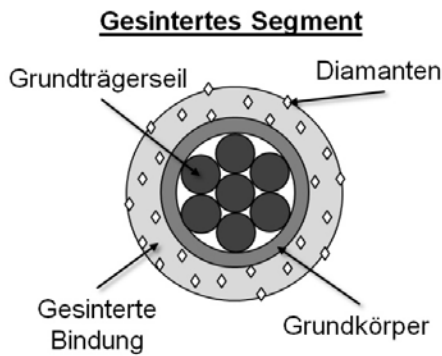


Abbildung 24: Gesintertes Segment im Schnitt

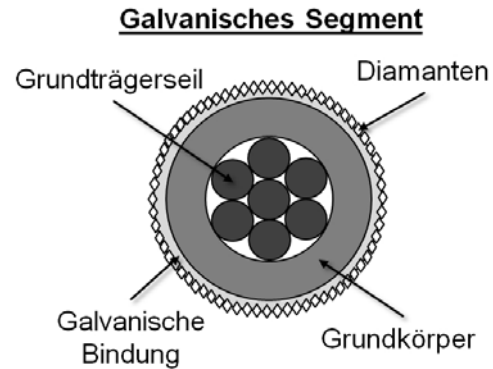


Abbildung 25: Galvanisches Segment im Schnitt

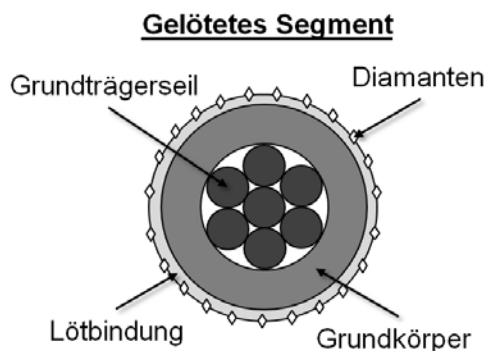


Abbildung 26: Gelötetes Segment im Schnitt



Abbildung 27: Galvanisches Segment mit Verschleißerscheinungen

Bedingt durch das Herstellungsverfahren lagern sich die Diamanten nur auf der Mantelfläche des Segments einschichtig ab. Dies ermöglicht eine anfänglich hohe Schnittleistung, die jedoch mit zunehmenden Ab- oder Ausbrechen der Diamanten schnell abnimmt. Aufgrund der hohen Schnittleistung werden Diamantseile mit Segmenten aus galvanisch gebundenen Diamanten für „harte“ Werkstoffe wie Stahl oder Granit verwendet.

2.8.2.2 Sinterbindung

Eine jüngere Herstellungsart für die Diamantsegmente ist die Sintertechnik. Gesinterte Segmente kamen erstmals 1983 auf den Markt. Die Bindung der Diamanten imprägnierter Werkzeuge wird hier durch einen Sinterprozess erreicht. Dabei wird der Bindungswerkstoff in Pulverform, der zuvor mit Diamanten möglichst gleichmäßig vermischt wurde, unter erhöhtem Druck in Graphitformen erhitzt. Die Temperaturen bleiben jedoch unterhalb der Schmelztemperatur der Hauptkomponenten, so dass die Form des Werkstückes erhalten bleibt. Es kommt zu einer Schwindung, weil sich die Partikel des Ausgangsmaterials verdichten und die Porenräume gefüllt werden. Durch die Temperaturbehandlung beim Sintern wird aus einem fein- oder grobkörnigen Grünkörper, der in einem vorangegangenen Prozessschritt, beispielsweise mittels Extrusion geformt wurde, ein festes Werkstück [69].

Gesinterte Segmente haben den Vorteil, dass die Diamanten in der kompletten Bindung homogen verteilt liegen. Die Segmente sind deshalb auf eine gewisse Art „mehrschichtig“. Brechen die äußeren Diamanten im Zuge des Bearbeitungsprozesses ab oder aus, so

werden neue tiefer liegende Diamanten nach und nach freigelegt. Bei diesen Werkzeugen müssen die Parameter, Diamanten und Einstellbedingungen auf den zu bearbeitenden Werkstoff abgestimmt werden. Mit dem Verschleissen der Körner an der schneidenden Oberfläche muss die Bindung so weit zurückgesetzt werden, dass dadurch neue freigelegte Diamanten den Trennprozess übernehmen. Dieser Prozess wird als Selbstschärfungseffekt bezeichnet und ist bei imprägnierten Werkzeugen unverzichtbar. Bei zu geringem Abrieb der Bindung geht der Spanraum verloren und das Werkzeug würde, unter sich ständig erhöhender Kraft und Temperatur, ohne zu spanen über das Werkstück gleiten [1].

Die Schnittleistung bleibt durch die nahezu homogene Verteilung der Diamanten über die gesamte Bindung hinweg gleich, jedoch fällt sie im Vergleich zu galvanisch belegten Segmenten geringer aus, da während des Trennprozesses weniger Diamanten im Eingriff sind. Über die Differenz zwischen neuem und aktuellem Durchmesser können so Rückschlüsse auf den Verschleiß getroffen werden. Diamantseile mit gesinterten Segmenten finden vor allem beim Trennen von Betonen Verwendung.

2.8.2.3 Lötbindung

Gegen Ende des letzten Jahrtausends wurden die Diamantsegmente anhand verschiedener Lötverfahren gefertigt. Die Diamanten werden dabei einzeln erfasst und an das Segment angelötet. Bei diesem Verfahren wird der Nachteil ausgeglichen, dass die Körner nicht zufällig angeordnet sind, sondern in einem präzisen Raster positioniert werden können. Durch den definierten Freiraum zwischen den Körnern werden der Abtransport der Späne und der Transport von Kühlschmierstoff erleichtert. Somit wird beim Bearbeitungsprozess das Zusetzen der Freiräume erschwert und die Standzeit wird erhöht [70]. Gelötete Segmente besitzen gegenüber den anderen beiden Herstellungsverfahren Vorteile, sind jedoch in der Herstellung immer noch teurer und finden deshalb nur wenig Verbreitung am Markt.

2.8.3 Synthetische Kornwerkstoffe

Die synthetisch hergestellten Kornwerkstoffe haben die natürlichen Schleifmittel wie beispielsweise Quarz oder Granat weitestgehend ersetzt. Die wichtigsten synthetischen Kornwerkstoffe sind:

- Korund (Al_2O_3)
- Siliziumkarbid (SiC)
- kubisches Bornitrid (cBN)
- (synthetischer) Diamant

Korund und Siliziumkarbid gehören zu der Gruppe der konventionellen Schleifmittel, kubisches Bornitrid und Diamant sind der Gruppe der hochharten Schleifkornmaterialien zugeordnet. Eine Übersicht über die Härte und die Bruchzähigkeit dieser Kornwerkstoffe ist in Abbildung 28 dargestellt.

Die höhere Leistungsfähigkeit der hochharten Kornwerkstoffe verglichen mit der konventioneller Kornwerkstoffe wird bei dieser Darstellung sehr deutlich. Obwohl die Härte der Kornwerkstoffe deutlich höher ist als die der zu bearbeitenden Werkstoffe, ist die Zähigkeit des Schleifmittels um ein Vielfaches geringer. Es ist somit ersichtlich, dass weitere Leistungssteigerungen durch die Entwicklung neuer Kornwerkstoffe mit einer extrem hohen

Härte bei ausreichender Zähigkeit erreicht werden können [71]. Zum Vergleich sind die Härte- und die Zähigkeitsbereiche häufig zu schleifender Materialien wie Werkzeugstahl, Schnellarbeitsstahl (HSS) und Hartmetall ebenfalls in Abbildung 28 dargestellt.

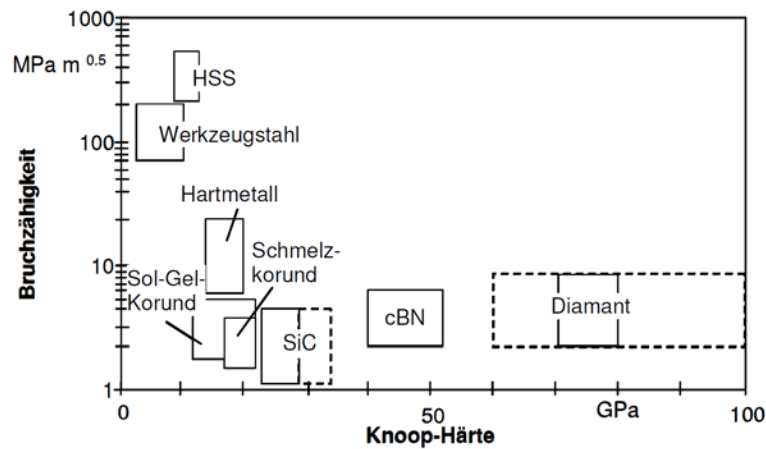


Abbildung 28: Härte und Bruchzähigkeit synthetischer Schleifkornmaterialien [71]

2.8.4 Synthetischer Diamant

Etwa 80 % der Naturdiamanten, die aufgrund ihrer geringen Größe und mangelnden Reinheit nicht für die Schmuckherstellung geeignet sind, stehen als Industriediamanten zur Verfügung. Jedoch wird der bei weitem überwiegende Teil der Diamant-Schleifkörner synthetisch hergestellt. Die Eigenschaften sind nahezu identisch mit denen natürlicher Diamanten [72]. Als Ausgangsmaterial dient Kohlenstoff in Form von Graphit. Die Synthese erfolgt bei Drücken um 7.000 bis 12.000 MPa und Temperaturen um 2.000 °C unter Zugabe metallischer Katalysatoren. Aufgrund einer geeigneten Wahl der Synthesebedingungen, z. B. der jeweiligen Kombinationen von Druck, Temperatur und chemischen Gegebenheiten, lässt sich die Wachstumsrate der Diamantkristalle über einen Größenbereich von mehreren Potenzen variieren und regeln. So kann beispielsweise ein Schleifmitteldiamant von brauchbarer Größe innerhalb weniger Sekunden bei geeigneten Temperatur- und Druckwerten gewonnen werden. Dabei wird die Wachstumsrate durch Synthesezeiten, die im Promillebereich einer Sekunde liegen, so vermindert, dass die für bestimmte Schleifprozesse erforderlichen Kristallgrößen erzeugt werden [73].

Zu den hervorstechenden Eigenschaften des Diamanten als Kornwerkstoff gehört seine extreme Härte, die von keinem anderen Werkstoff erreicht wird. Die Knoop-Härte ist mit 7.000 bis 8.000 HK etwa doppelt so groß wie bei den herkömmlichen Kornwerkstoffen Korund und Siliziumkarbid (siehe Abbildung 28) [74]. Die Härteprüfung nach Knoop ist eine Abwandlung der Vickers-Härteprüfung. Der Unterschied besteht darin, dass die in der Vickers-Prüfung gleichseitige Diamantspitze in der Knoop-Prüfung eine rhombische Form besitzt.

Diamant hat im Vergleich zum Korund oder Siliziumkarbid eine sehr große Wärmeleitfähigkeit. Das Diamantkorn gibt daher die in der Zerspanungszone entstehende Wärme schnell an die Bindung weiter. Das kann beispielsweise unter extremen Bedingungen die Kunstharzbindung an der Schnittstelle Korn/Bindung zerstören und somit zu frühzeitigem Kornausbruch führen. Beschichtungen der Diamantkörner mit Nickel, Kobalt oder Verbundmetallen wirken daher als Wärmebremse. Sie können darüber hinaus die Haftung

zwischen Korn und Bindung erhöhen. Unter Einwirkung kleiner Drücke setzt beim Diamanten bei Temperaturen ab ca. 900 °C unter der Voraussetzung, dass genügend Sauerstoff vorhanden ist, eine Graphitisierung ein [75].

2.8.5 Spanbildungsprozess

Voraussetzung um einen Span zu bilden ist, dass die in das Werkstück eingreifenden Schneidkörper über eine höhere Härte verfügen müssen als das zu zerspanende Material. Die Diamanten splintern während des herstellungsbedingten Zerkleinerungsprozesses, so dass die Bruchstücke eine regellose Form mit mehr oder weniger scharfen Ecken und Kanten besitzen. Die Diamanten stehen aus der Bindungsmatrix des Diamantsegments unterschiedlich weit heraus und kommen dadurch verschieden stark in Eingriff. Nur besonders hervorstehende Diamanten beziehungsweise Teile der Diamantoberfläche dringen während der Zerspanung in das Werkstück ein und bewirken die Materialzerspanung.

Die Spanungsdicke eines einzelnen Schneidkorns ist die sogenannte Einzelkornspanungsdicke h_{cu} . h_{cu} wird durch die Spangröße und Kornkonzentration, sowie der Eingriffskinetik des Trennprozesses beeinflusst. Wegen der großen Anzahl an Schneiden ist eine messtechnische Erfassung der Geometrie aller Einzelschneiden eines Werkzeuges nur mit hohem Aufwand realisierbar. Aufgrund von Verschleiß kommt es zu einer stetigen Veränderung von Schneidengeometrie und -anzahl [74]. Der Eingriff eines Schleifkorns in den Werkstoff ist vollkommen verschieden vom Eingriff einer geometrisch bestimmten Schneide. Ein Überblick über das vielseitige Werkstoffverhalten beim Korneingriff kann aus Abbildung 29 gewonnen werden.

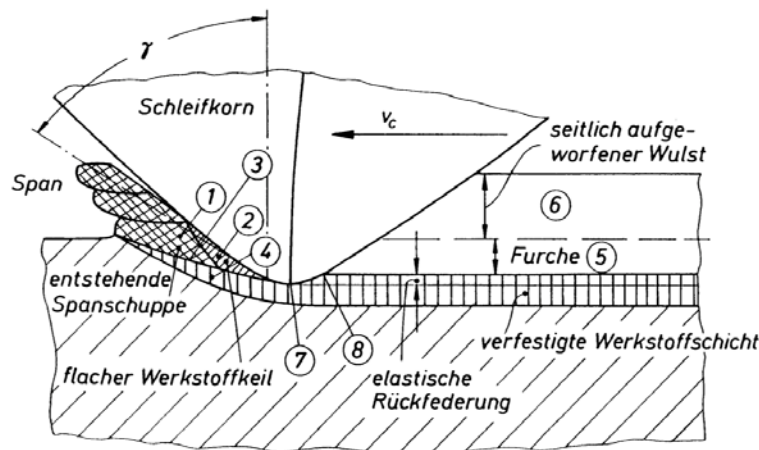


Abbildung 29: Vorgänge beim Schleifkorneingriff [76]

Insgesamt können drei Arten des Werkstoffabtrags beim Schleifen unterschieden werden:

- **Mikrospanen**

Vor dem Schleifkorn staucht sich der Werkstoff (1) und wird zwischen einem langsam nach oben fließenden Werkstoffkeil (2) und der Scherebene (3) zu Spanschuppen geformt. Diese Spanschuppen, die zusammenhängend einen Scherspan oder Fließspan bilden können, werden aus dem Werkstück herausgedrückt und abgeschert.

- **Mikropflügen**

Diese Abtragsart tritt bei kleineren Spanwinkeln auf, die bei flachem Eintauchen des Schleifkorns in das Werkstück vorkommen. Der Werkstoff wird nur nach unten und zur Seite verdrängt (4) und aufgrund von Überschreiten der elastischen Streckgrenze verfestigt. Dabei werden seitlich der vom Korn gezogenen Furche (5) Wülste aufgeworfen (6). Die Randwülste bilden sich zu flachen spanförmigen Bändern mit glatter Oberfläche und geschuppter Unterseite aus, die Scherspänen zum Verwecheln ähnlich sind. Der Abtrag entsteht erst nach vielfacher plastischer Verformung durch die Vielzahl der Schleifkörner. Der Werkstoff ermüdet allmählich und die seitlich aufgeworfenen und niedergedrückten Randwülste brechen ab oder werden abgerissen. In Abbildung 30 ist die Entstehung der Wülste dargestellt.

- **Mikrofurchen**

Das Mikrofurchen kommt bei besonders kleinen Eindringtiefen eines Schleifkorns zu Stande. Der Werkstoff wird nur sehr wenig gepflügt und nicht abgespannt. Durch plastisches Querfließen, in einer Tiefe von wenigen Mikrometern unterhalb der Oberfläche, übersteigen die Spannungen im Material die Scherfestigkeit. Dabei lösen sich sehr dünne Blättchen und Bänder, die wie dünne Bandspäne aussehen [76].

Von den drei Abtragsarten ist das Mikrospanen die wirkungsvollste, aber aufgrund unterschiedlichster Einflussgrößen nur selten vorzufinden. Das Mikropflügen ist die häufigste Art des Werkstoffabtrags. Das Mikrofurchen ist unwirtschaftlich, weil die abgetragenen Teilchen nur sehr dünn sind. In der Praxis wird stets nach Wegen gesucht, die Wirksamkeit des Bearbeitungsvorgangs zu verbessern, also den Anteil des Mikrospanens am Trennprozess zu vergrößern.

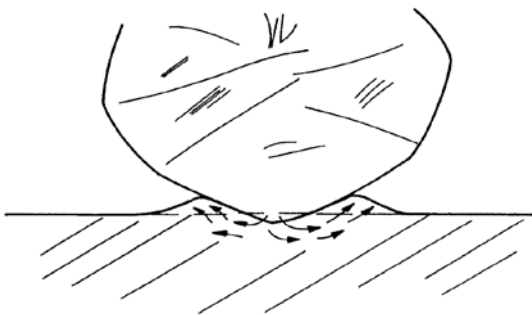


Abbildung 30: Werkstoffverdrängung beim Eindringen eines stumpfen Korns [76]

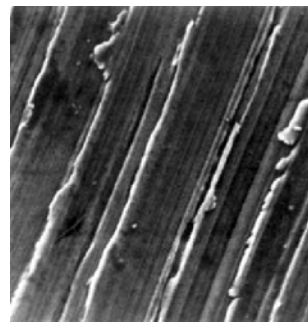


Abbildung 31: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Werkstückoberfläche [76]

Auf rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen von geschliffenen Werkstückoberflächen ist zu erkennen (Abbildung 31), dass sich die Verformungen mehrfach überlagern. Dabei können von einem Korn gezogene Furchen durch Randwülste von Nachbarfurchen wieder zugedeckt werden. Vor dem Schleifkorn und in der Furche entsteht zwischen Kornspitze, Kornseitenflächen und Furchengrund Reibung. Sie ruft eine Erwärmung des Werkstücks hervor, die zu einer Gefügeänderung führen kann. Hinter dem Korndurchgang federt der Werkstoff geringfügig wieder elastisch zurück [76].

Neben diesem kinematischen Ansatz ist das Stoffverhalten des Werkstücks zu berücksichtigen. Der Werkstoff des Werkstücks kann unter den gegebenen Prozessbedingungen (Spannungsdicke, Temperaturverteilung) zu einem duktilem oder zu einem sprödem Formänderungs- und Trennverhalten neigen. Untersuchungen zum Einkornritzen an sprödharten Werkstoffen haben gezeigt, dass es unterhalb einer bestimmten Ritznormalkraft zu beliebig langen, rissfreien, plastisch verformten Ritzspuren am Bauteil kommt. Bei höheren Ritznormalkräften beziehungsweise Spannungsdicken brechen direkt nach dem Ritzvorgang im Bereich hinter der Schneide durch Zugeigenspannungen Entlastungsrisse auf und führen vermehrt zur spröden Materialtrennung, wie in Abbildung 32 dargestellt ist.

Aus der tangentialen Schleifkraftkomponente F_t leitet sich in Verbindung mit der Schnittgeschwindigkeit v_c und dem Zeitspanvolumen Q_w die spezifische Schleifenergie e_c her. Wird das Zeitspanvolumen Q_w auf die Schleifbreite des Kornes b_s bezogen, ergibt sich das bezogene Zeitspanvolumen Q'_w . Die spezifische Schleifenergie e_c bezeichnet diejenige Energie, die unter den gewählten Schleifbedingungen zur Abtrennung eines bestimmten Werkstoffvolumens erforderlich ist [77].

$$Q'_w = \frac{Q_w}{b_s} \quad (2)$$

$$e_c = \frac{P_c}{Q_w} = \frac{F_t \cdot v_c}{Q'_w \cdot b_s} \quad (3)$$

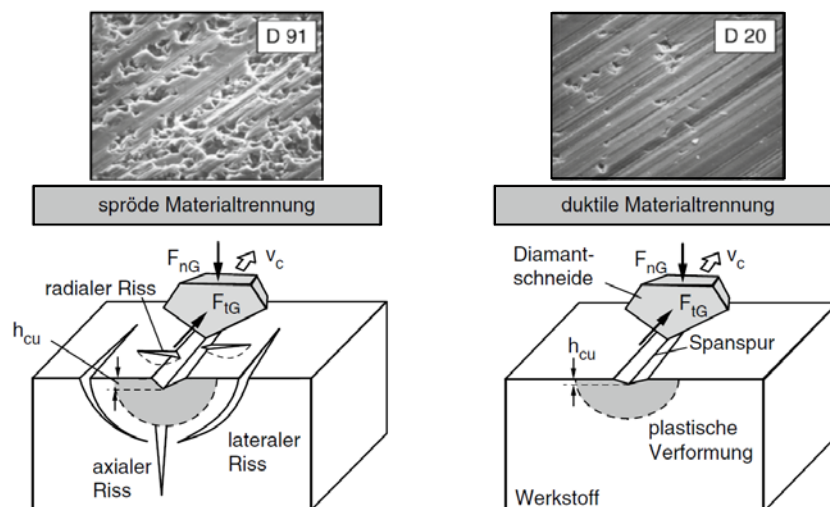


Abbildung 32: Materialtrennmechanismen an sprödharten Werkstoffen [63]

Dabei findet keine Unterscheidung hinsichtlich der Aufteilung beziehungsweise der Ursache des Energiebedarfs statt. Die Reibungs-, Bruch- und Verformungsvorgänge werden gemeinsam erfasst [77]. Die spezifische Schleifenergie e_c entspricht in ihrer Bedeutung der spezifischen Ritzenergie. Sie ermöglicht die Beurteilung der energetischen Effizienz des Zerspanungsvorgangs [78].

Die Größe der mittleren Einzelkornspannungsdicke des Schleifprozesses besitzt einen entscheidenden Einfluss auf die auftretende Materialtrennung. Geringere Einzelkornspannungsdicken bewirken eine eher duktile Trennung, wohingegen der Einsatz grobkörniger Schleifkörner zu vermehrt spröder Materialtrennung führt [79]. In der vorliegenden Arbeit wurden nur metallische Werkstoffe getrennt, weshalb von einem duktilen Trennverhalten ausgegangen werden kann.

2.8.6 Prozessgrößen beim Seilsägen

Die Kräfte im Diamantseil sind abhängig von der Eingriffskinematik des Diamantseils mit dem Werkstück. Wesentliche Faktoren für diese Kräfte sind die Eingriffslänge l_e des Diamantseils am Werkstück sowie der Eingriffswinkel α , die sich beide im fortschreitenden Trennprozess verändern.

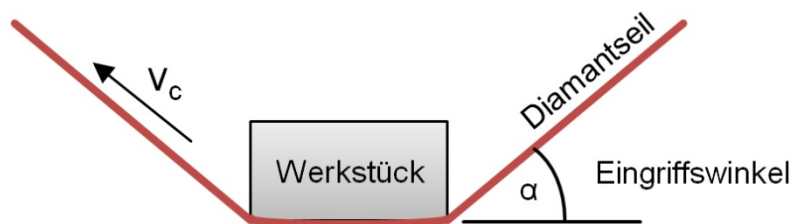


Abbildung 33: Darstellung des Eingriffswinkels

Ebenso ändert sich der Reibungswiderstand der zwischen den einzelnen Schneidsegmenten und dem Werkstück wirkt. Während des Trennprozesses ist jedes Diamantsegment demselben phasenverschobenen Belastungszyklus ausgesetzt. Somit können die Schnittbedingungen für jedes Diamantsegment an diskreten Stellen des Schnittumfangs als konstant angenommen werden. Mit stetem Bearbeitungsfortschritt ändern sich, bedingt durch die Schnittkontur, die Schnittbedingungen [80]. Beim umschlingenden Verfahren ist zu beachten, dass sich die Eingriffskinematik gegenüber dem Tiefschnittverfahren stetig verändert. Die Zahl der sich ändernden Variablen ist beim umschlingenden Verfahren höher, da beispielsweise der Eingriffswinkel, anders als beim Tiefschnittverfahren, nicht konstant gehalten werden kann.

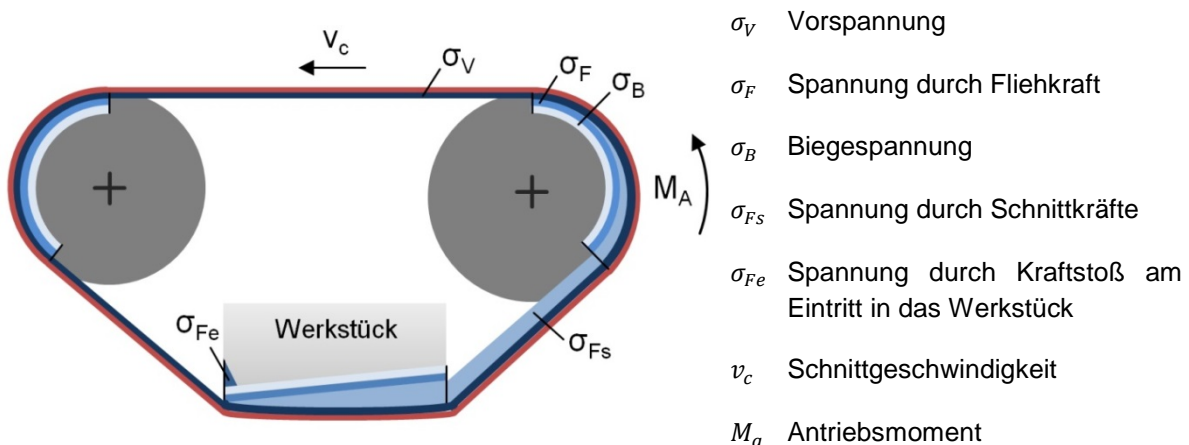


Abbildung 34: Seilspannungen beim umschlingenden Verfahren nach [1]

Die Beanspruchungen des Seiles sind in Abbildung 34 in Form von Spannungen über die Seillänge aufgetragen. Die Spannungen im Seil sind im wesentlichen von der Vorspannung, der Biegespannungen im Seil, der Spannungen, die durch die Schnittkräfte hervorgerufen werden, sowie durch die Spannungen, die durch den Eintritt des Werkzeuges in das Werkstück entstehen, abhängig. Ebenfalls treten Spannungen durch die auftretenden Fliehkräfte auf [1].

Die Bewegungsgeschwindigkeiten, die ein Diamantsegment während des Trennens erfährt, sind in Abbildung 35 aufgeführt. Die Schnittgeschwindigkeit, mit der sich das Diamantseil bewegt, ist durch v_c gekennzeichnet. Diese Bewegung ist definiert als eine Bewegung zwischen Werkzeug und Werkstück, die zusammen mit der Vorschubbewegung eine stetige Spanabnahme ermöglicht [66][81]. Da das Diamantseil sehr flexibel ist und sich der Kontur des Werkstücks anpasst, kann es nicht als Ganzes im Prozess betrachtet werden, weshalb zur Veranschaulichung ein einzelnes Diamantsegment betrachtet wird. Die Vorschubbewegung v_f wird bei mobilen Maschinen durch die Zylinder im Seilspeicher erzeugt oder bei Portalmaschinen durch Führungen, auf denen die komplette Maschine verfährt.

Aus Schnitt- und Vorschubbewegung resultiert die Wirkbewegung v_e , die in Abbildung 35 dargestellt ist. Diese Wirkbewegung ist schlussendlich für den Vorgang der Zerspanung verantwortlich. Bei der in Abbildung 35 dargestellten Ebene handelt es sich um die Arbeitsebene P_{fg} . Sie ist eine gedachte Ebene, die durch die Schnittrichtung und die Vorschubrichtung im Schneidpunkt verläuft. In der Arbeitsebene vollziehen sich die Bewegungen, die an der Spanentstehung beteiligt sind. Alle Arbeiten erfolgen immer in dieser Ebene, auch wenn das Werkzeug mehrere Schneiden besitzt, wie es beispielsweise bei einem mit Diamanten besetzten Umfang eines Diamantsegmentes der Fall ist.

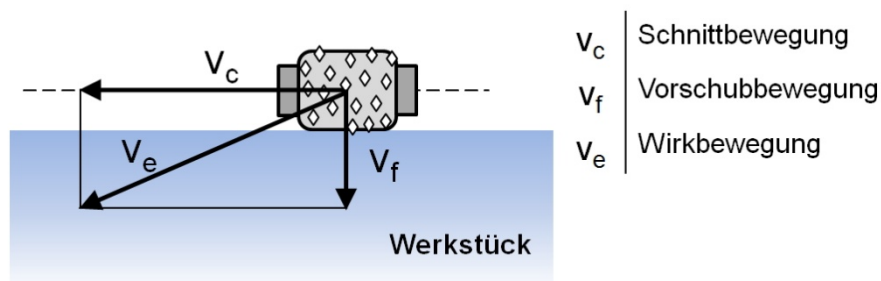


Abbildung 35: Prozesskinematik eines Diamantsegmentes in der Arbeitsebene

Die am Diamantkorn angreifenden Bearbeitungskräfte werden durch Formschluss in das Schneidsegment geleitet. Die durch die Gesamtzerspankraft auf ein Diamantsegment wirkenden Kräfte können vektoriell in drei Komponenten zerlegt werden [1]. Diese Prozesskräfte, die während des Trennens auf ein Diamantsegment wirken, sind in Abbildung 36 aufgeführt.

Die drei Komponenten lauten:

- Normalkraft F_n : mit Wirkrichtung in die Seilkrümmung
- Tangentialkraft F_t : mit Wirkrichtung entgegen der Schnittbewegung
- Seitenkraft F_a : mit Wirkrichtung orthogonal zu F_n und F_t

Die Normalkraft F_n ergibt sich aus der Seilkraft F_s . Der Betrag der Normalkraft F_n lässt sich errechnen, indem die beiden Kraftvektoren der Seilkräfte F_s unter dem Winkel α einer Vektoraddition unterzogen werden. Die resultierende Kraft ist die Normalkraft F_n . α gibt den Winkel an, unter dem das Diamantseil am Werkstück anliegt. Je größer dieser Seilkrümmungswinkel, desto größer wird die Normalkraft F_n . Die Seilkraft F_s wird bestimmt durch die Seilspannung σ , die im Zuge der Vorschubbewegung v_f aufgebracht wird. Deshalb gilt, je größer die Seilspannung σ , desto größer fällt auch die Normalkraft F_n aus. Die Seilkraft F_s kann errechnet werden durch die Fläche des Diamantseils A_s und der aufgebrauchten Spannung σ :

$$F_s = \sigma \cdot A_s \quad (4)$$

Die Normalkraft F_n wird teilweise durch die Zentrifugalkraft F_z entlastet. Hervorgerufen durch die Geschwindigkeit des geschlossenen Diamantseils bewegen sich die Diamantsegmente nach außen weg und es entsteht eine Fliehkraft die entgegen der Normalkraft F_n wirkt.

Die Tangentialkraft F_t wird durch den Kontakt von Werkzeug und Werkstück in Bewegungsrichtung erzeugt. Sie wird durch den Reibungskoeffizienten μ und Normalkraft F_n beschrieben:

$$F_t = \mu \cdot F_n \quad (5)$$

Die Seitenkraft F_a ist systembedingt normal zur Arbeitsebene und nimmt somit theoretisch den Wert null an [1]. Um der einseitigen Abnutzung des Diamantseils entgegenzuwirken, wird das Diamantseil oftmals beim Verbinden in sich eingedreht. Durch diese Verdrillung kommt es jedoch während des Trennprozesses zu kleinen Rotationsbewegungen, so dass die Seitenkraft F_a stets einen Wert > 0 aufweist, allerdings nur, um einen gleichmäßigen Abtrag zu gewährleisten.

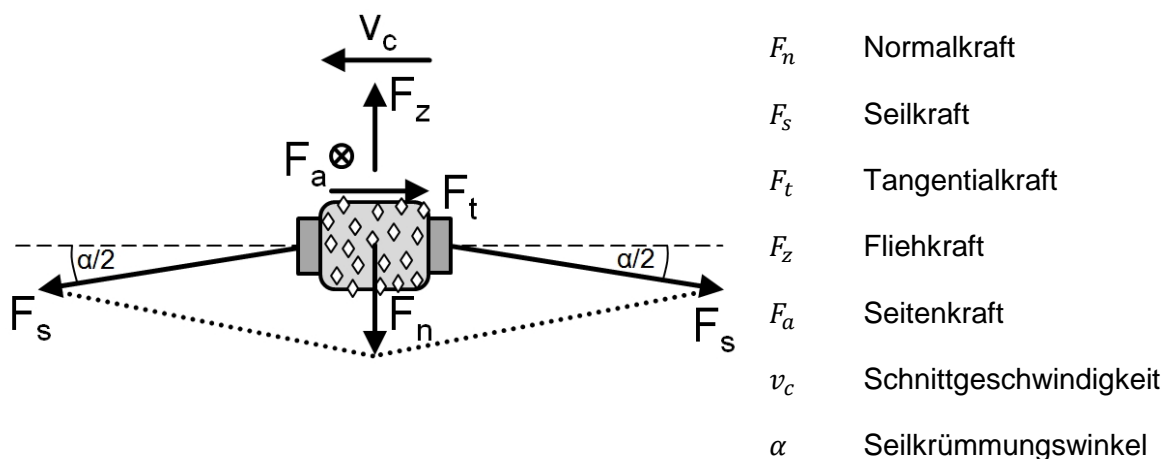


Abbildung 36: Prozesskräfte die auf ein Diamantsegment wirken

Die während des Trennprozesses umgesetzte Leistung P_C lässt sich aus dem Produkt von Schnittgeschwindigkeit und Tangentialkraft bilden, unter der Voraussetzung, dass die Vorschubgeschwindigkeit v_f wesentlich kleiner als die Schnittgeschwindigkeit v_c ist [79]. Damit ergibt sich für die Leistung P_C :

$$P_C = v_c \cdot F_t \quad (6)$$

Die Produktivität des Werkzeuges stellt bei einer wirtschaftlichen Betrachtung des Werkzeuges eine wichtige Kenngröße dar. Als Standzeitkriterium wird das erzeugte Schnittvolumen bis Standzeitende bezogen auf die Länge des Diamantseils definiert [82].

Das Zeitspanvolumen, das theoretisch von einem Werkzeug erreicht werden kann, ist abhängig von mehreren Faktoren, wie beispielsweise der Seilumfangsgeschwindigkeit und der Normalkraftverteilung, die von den Schneidkörpern auf das Werkstück wirken. Dieser Verlauf variiert entlang des im Eingriff befindlichen Abschnitts in Abhängigkeit von der Seilspannung und dem Schnittkurvenverlauf. Diese komplexen Beziehungen, dass die Schnittbedingungen nicht dauerhaft über dem Schnitfortschritt konstant sind, erschweren die Betrachtung zusätzlich [83].

2.8.7 Energieverteilung

Die beim Trennprozess eingebrachte mechanische Energie wird hauptsächlich in Wärme umgewandelt. Die Wärme verteilt sich auf die vier am Trennprozess beteiligten Elemente: dem Werkzeug, dem Werkstück, dem Span und dem Kühlschmierstoff. Durch Reibung an der Spanfläche und während des Abscherens der Späne entsteht Wärme. Bei gebundenem Korn wird ein geringer Teil der mechanischen Energie noch dadurch in Wärme umgewandelt, dass die Bindung auf dem Werkstück reibt. Der Großteil der in den Prozess eingebrachten Energie wird in Wärme umgewandelt. Daher erfahren alle Systemkomponenten, die an der Spanbildung beteiligt sind, eine thermische Belastung beziehungsweise führen Wärme ab.

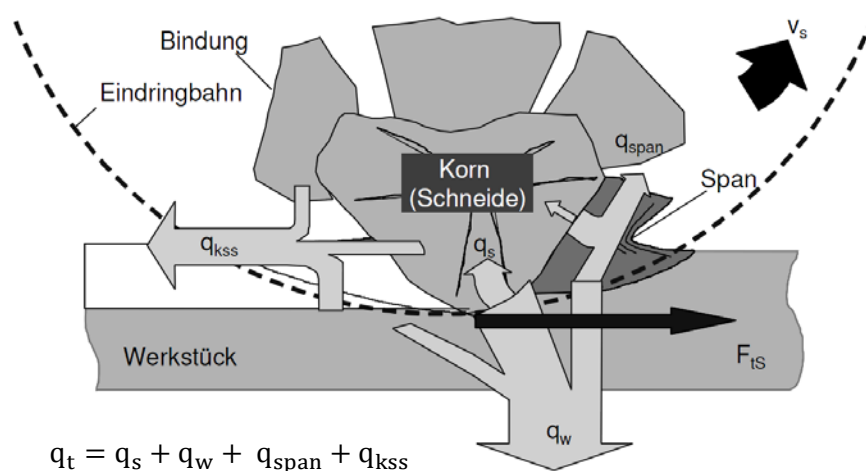


Abbildung 37: Energieverteilung und Wärmefluss während des Schneideneingriffs [74]

Der gesamte Wärmestrom q_t verteilt sich in der Kontaktzone auf die Schneidkörper (q_s), das Werkstück (q_w), die Späne (q_{span}) und den Kühlschmierstoff (q_{kss}). Wie hoch die einzelnen Anteile der Wärmeströme sind, hängt unter anderem von den Wärmeleitkoeffizienten des Werkstückmaterials, des Kühlschmierstoffs und der Schneidkörper sowie den Wärmeübergangskoeffizienten ab [84][85].

Der Wärmestrom, der in das Werkstück gelangt, kann zu einem örtlichen Temperaturanstieg führen. Dieser Temperaturanstieg kann je nach Höhe und Einwirkzeit thermische Gefügeveränderungen in der Werkstückrandzone hervorrufen. Durch den Einsatz von Kühlschmierstoff lassen sich die Einwirkzeit der Wärme und die Höhe des Temperaturanstieges günstig beeinflussen und Gefügeveränderungen vermeiden [74].

2.8.8 Verschleiß

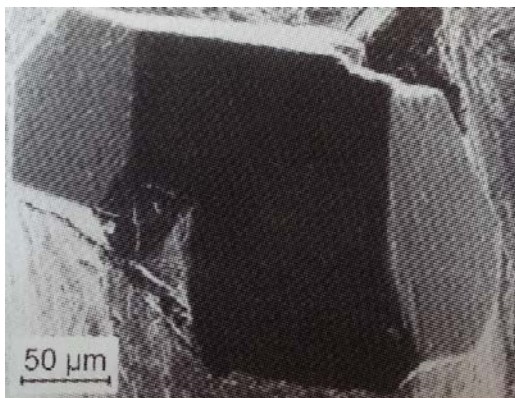
Die Wirtschaftlichkeit des Trennprozesses wird durch die Schneidleistung, also der Schneidarbeit pro Zeit, sowie durch die Standzeit des Werkzeuges, dem Diamantseil, bestimmt. Der Verschleiß und dessen zeitlicher Fortschritt haben entscheidenden Einfluss auf das Trennprozessverhalten und somit auf die Wirtschaftlichkeit [82]. Es sind verschiedene Arten von Verschleißformen beobachtbar. Verschleiß am Werkzeug lässt sich in zwei Kategorien einordnen. Zum einen Verschleiß am aktiven Diamant durch die abrasive Wirkung unter thermischer und mechanischer Belastung [39][86]. Zum anderen durch die starke Abrasion an der Bindungsmatrix der Diamantsegmente. Diese Abrasion wird hervorgerufen durch die Mischung von Kühl- und Schmiermittel sowie den Zerspanprodukten beziehungsweise den Verschleißprodukten des Diamanten [87].

Aufgrund der Belastung während des Trennprozesses verschleißt das Diamantkorn. Durch den Verschleiß ändern sich dessen Form und Größe. Ebenfalls verschleißt die Bindungsmatrix, so dass die Diamantkörner ihren Halt verlieren und ausbrechen. Beim Kornverschleiß lassen sich nachfolgende Verschleißarten unterscheiden [39][63][88]:

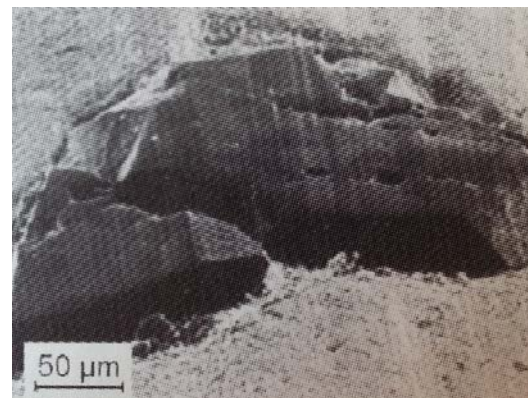
- **Abrasion**
Als Folge der Reibung zwischen Korn und Werkstoff kommt es zu mechanischem Abrieb. Das Korn wird kontinuierlich abgetragen und bildet auch hier unerwünschte, verrundete Schneidkanten, da sich Reib- und Scherkraft steigern. Der Volumen- oder Radiusverschleiß an den Diamantkörnern ist gering.
- **Absplittern**
Durch thermische Beanspruchung und anschließende schnelle Abkühlung, aber auch durch mechanische Belastung bei ausreichender Splitterfähigkeit des Schleifkorns, splintern Teile der Körner ab und bilden so neue Schneidkanten. Diese Verschleißart ist daher günstig, da wieder scharfe Schneiden entstehen. Der Volumen- und Radiusverschleiß ist zwar gegenüber dem abrasiven Verschleiß größer, allerdings noch ausreichend gering.
- **Ausbrechen**
Bei dieser Verschleißart brechen ganze Körner aus dem Bindungsverband aus. Die Kornhaltekräfte der Bindung reichen nicht aus, die Bindung ist zu weich. Es kommt zu starkem Volumen- und Radiusverschleiß. Der Schneidkörper behält allerdings die Schneidfähigkeit.

Die Abnutzung der scharfen Kanten und Ecken des Schleifkorns beim Eingriff in den Werkstoff erfolgt durch Abrasion und Absplittern kleiner Kristallteile aus dem Korn. Es werden immer die Teile am meisten abgenutzt, die am stärksten belastet sind. Meist also die Ecken, die am weitesten in den Werkstoff eingreifen. Damit verursacht diese Art des Verschleißes eine Verkleinerung der Wirkrautiefe und eine Vergrößerung der Anzahl der Schleifkörner, die an der Zerspanung teilnehmen. In Bezug auf eine verbesserte Oberflächenqualität des Werkstücks ist dieser Verschleiß günstig. Die Abstumpfung des Kornes gilt als Nachteil, da dies die Reibung vermehrt und die Schleifkräfte vergrößert. Die dabei zunehmende Erwärmung des Werkstücks kann zu thermischen Schädigungen des Gefüges, zu Zugeigenspannungen und zu Schleifrissen in der bearbeiteten Oberfläche führen [76].

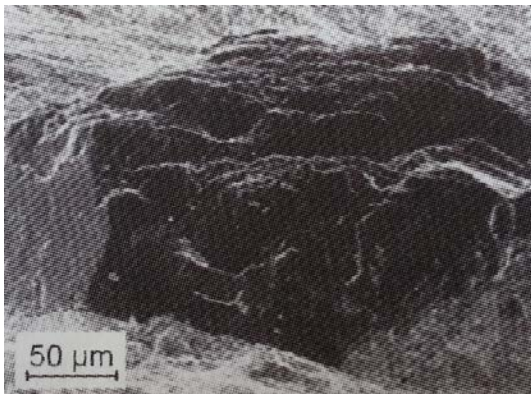
Neben dem Verschleiß am Diamantkorn kann es ebenfalls zum Verschleiß an der Bindungsmatrix kommen. Der Schlamm aus Kühlflüssigkeit und Zerspanprodukten kommt nicht nur mit dem Diamantkorn, sondern auch mit der Bindungsmatrix in Kontakt, die dadurch abgetragen wird. Eine zu weiche Matrix verschleißt schneller als die in ihr gebundenen Diamanten [82][89]. Das hat zur Folge, dass noch schneidfähige Diamantkörner durch die Belastung des Schneidprozesses aus ihrer Bindung herausgebrochen werden. Ist jedoch die Bindungsmatrix zu hart, so wird sie durch den im Prozess erzeugten Schneidschlamm weniger zurückgesetzt als die Diamantkörner durch den Eingriff in das Material. Dadurch stehen nur wenige bis keine Diamanten aus der Matrix heraus. Das Diamantsegment wird somit stumpf, reibt auf dem Werkstück, wodurch es zu ansteigenden Prozesskräften kommt. Ein optimaler Verschleiß vollzieht sich, wenn Diamantkorn und Bindungsmatrix gleichmäßige Abtragsraten erzielen. So wird während des gesamten Trennvorgangs ein optimaler Kornüberstand am Werkzeug sichergestellt [90].



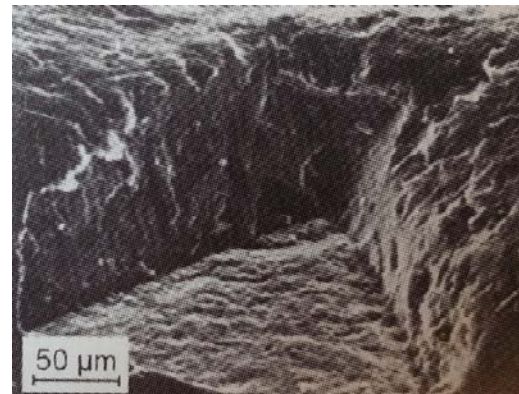
Neu



Abgeflacht durch Abrasion



Gesplittert



Ausgebrochen

Abbildung 38: Kornverschleißarten [39]

Beim Trennen sehr duktiler Materialien ist häufig das Zusetzen der Spanräume auf dem Diamantsegment zu beobachten. Abgetragene Werkstoffspäne, vermischt mit Diamantkorn- und Bindungsabrieb, können die Spanräume so zusetzen, dass das Eindringen der Diamantkörner in den Werkstoff erschwert wird. Ein erstes Zusetzen ist an punktförmigen metallisch glänzenden Stellen zu erkennen. Sie können sich verstärken, bis der größte Teil der Spanarbeitsfläche bedeckt ist und es zu keinem Trennfortschritt mehr kommt. Es entsteht vermehrt Reibung und die Kräfte, insbesondere die Schnittnormalkräfte, nehmen zu.

Am Werkstück entstehen blanke glatte Stellen, die stärker erhitzt werden als beim Schleifen mit nicht zugesetzten, scharfen Diamanten. Daraus resultieren Schäden an den Werkstücken durch Gefügeänderungen, Zugeigenspannungen und Schleifrisse. Beseitigen lassen sich die Zusetzungen durch Abtragen der Schicht mit Abrichtdiamanten oder Aufrauen an einem Rollenabrichtgerät oder Abrichtblock [76].

Neben dem beschriebenen Diamant- und Matrixverschleiß stellen sich weitere Verschleißerscheinungen am Werkzeug ein. Bei Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück kommt es zum Abtrennen der Gummi- beziehungsweise Kunststoffummantelung am Trägerseil. Dies wird durch Reibung oder Verkanten des Diamantseils am Werkstück hervorgerufen. Begünstigt wird der Effekt ebenfalls durch zu kleine Biegeradien an den Umlenkrollen, die die Ummantelung zum Aufbrechen bringen. Dadurch erhöht sich die Ablösung der Ummantelung während des Trennprozesses, was zu Rissen im Werkzeug oder zum Aufschieben der Segmente führen kann. Beides hat zur Folge, dass eine kürzere Standzeit des Diamantseils erreicht wird [59].

Die Diamantseile werden anhand eines Verbinders, nachdem sie um das Werkstück gelegt worden sind, verbunden. Der Verbinder ist oftmals die schwächste Stelle im Diamantseil und kann durch mangelhaftes Verpressen während des Trennprozesses oder durch auftretende Verklebung mit dem Werkstück ausreißen. Solche Seilrisse sind aufgrund des Peitscheneffekts sehr gefährlich und nicht vermeidbar. Verhakungen sind vor allem beim inhomogenen Aufbau des Werkstückes häufig anzutreffen, hervorgerufen beispielsweise durch Hohlräume oder scharfe Kanten. Inhomogenitäten im Material führen vermehrt zu Seilrissen im Trägerseil oder am Verbinder [59][91].



Abbildung 39: konischer Verschleiß der Diamantsegmente im Vergleich zu Neuzustand

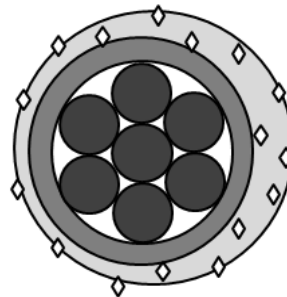


Abbildung 40: Exzentrischer Verschleiß

Des Weiteren kommt es bei den Diamantsegmenten zu konischem Verschleiß, der besonders beim umschlingenden Verfahren auftritt. Abbildung 39 zeigt einen solchen konischen Verschleiß. Hierbei liegt durch den resultierenden Seilkrümmungswinkel α des Werkzeuges die Hauptbelastung im vorderen Bereich der Diamantsegmente. Während des Trennprozesses schreitet die Reduzierung des Segmentdurchmessers von vorn nach hinten voran. Es bildet sich eine Konizität der Diamantsegmente in Laufrichtung aus. Solche Verschleißerscheinungen sind mit heutigen Methoden nur sehr schwer messbar, weshalb neue Verschleißmessgeräte entwickelt werden [57].

Überdies kann es während des Trennprozesses bei Diamantsegmenten zu einem exzentrischen Verschleiß kommen, wie in Abbildung 40 ersichtlich. Hierbei reduziert sich die Bindungsmatrix nicht wie vorgesehen radial mit der gleichen Geschwindigkeit, sondern wird

an einer Seite deutlich schneller abgenutzt. Die Gründe für dieses Verschleißverhalten sind weitgehend unbekannt, werden jedoch auf das Abplatzen des Schleifbelages durch Spitzenbeanspruchungen an einer Stelle des Diamantsegments zurückgeführt. Diese Verschleißform überträgt sich fortlaufend auf die folgenden Segmente bis schließlich die komplette Länge des Werkzeugs betroffen ist. Selbst eine neue Verbindung, die das Seil in sich um 180° dreht, erzielt keinen weiteren Fortschritt mehr. Ein wohl beeinflussender Faktor für die Fortführung des exzentrischen Verschleißes der Segmente ist die Anzahl der Eindreihungen am Diamantseil, den sogenannten Verdrillungen. Hierbei wird das Werkzeug vor dem Verschleifen zu einem Endlosseil um die Längsachse gedreht. Die Anzahl der Eindreihungen hängt von der Länge des Werkzeuges ab [31][59]. In der Praxis ist eine Eindreihung pro einem Meter Seillänge gebräuchlich.

2.9 Korngrößenverteilung

In dieser Arbeit wurden die angefallenen Späne der getrennten Materialien klassifiziert. Im nachfolgenden Text wird auf die nötigen Grundlagen der Korngrößenverteilung eingegangen. Die Gesamtheit einer anfallenden Masse, wie beispielsweise der Späne, wird mit unterschiedlichen Größeneinheiten betrachtet. So befinden sich darin Anteile mit verschiedenen Größen, die zwischen dem kleinsten und dem größten vorkommenden Durchmesser, in beliebiger Korngrößenverteilung verteilt, liegen.

Für die Versuche im Rahmen dieser Arbeit wurden die Korngrößen der DIN 18123 entsprechend in acht Klassen eingeteilt, den sogenannten Kornfraktionen. Somit ist jedes Spanteilchen der Gesamtmenge genau einer Kornfraktion zuzurechnen. Durch eine Siebanalyse der Gesamtmenge und Einteilung in die entsprechenden Kornfraktionen ergibt sich ein exaktes Bild über die Korngrößenverteilung der Gesamtmenge. Die Korngrößenverteilung wird als Körnungslinie (Summenlinie) auf einer einfach logarithmischen Skala so dargestellt, dass die Korngrößen in μm , auf der Abszisse logarithmisch in x-Richtung zunehmend aufgetragen werden. Die Massenanteile der Körner kleiner der Korngröße auf der Ordinate werden linear in y-Richtung zunehmend aufgetragen [92].

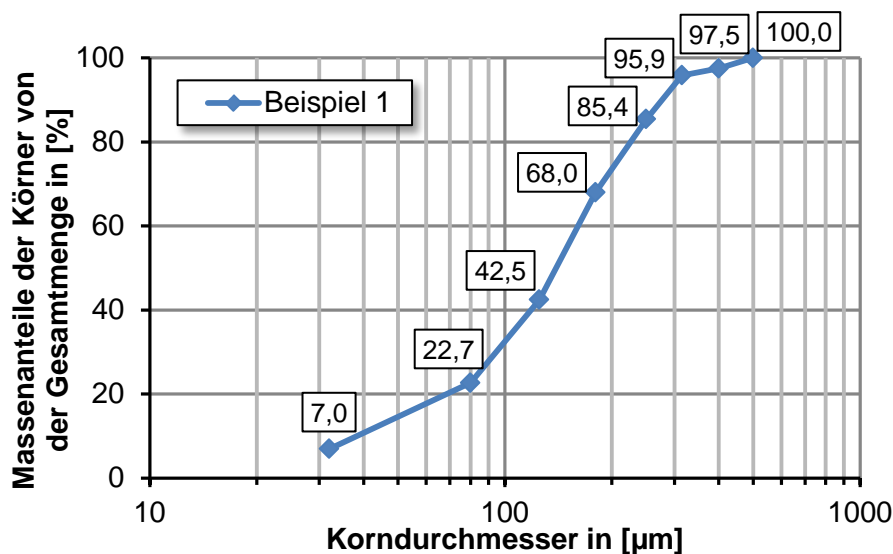


Abbildung 41: Körnungslinie eines Beispiels 1

Abbildung 41 zeigt ein beispielhaftes Diagramm einer solchen Körnungslinie. Die Darstellung einer Körnungslinie legt scheinbar eine lineare Verteilung der Korngrößen zwischen je zwei Messpunkten des Siebdurchgangs nahe, jedoch sind genaue Informationen zwischen den Messpunkten nicht vorhanden. Die Gesamtheit aller Körner zwischen zwei den Sieblochgrößen entsprechenden Messpunkten wird dem nächsthöheren Messpunkt zugewiesen und bildet eine Fraktion.

Durch Klassifizierung einer Stichprobe wird niemals das gleiche Ergebnis erreicht wie bei der Klassifizierung der Gesamtheit der Masse. Sehr deutlich wird dies, wenn sehr kleine Stichproben genommen werden. So sind im Fall der acht Fraktionen Stichproben mit weniger als acht Spanteilchen nie aussagekräftig, da mindestens eine Fraktion ohne zählbares Teilchen ist. Mit steigender Anzahl der Stichproben nähert sich das Ergebnis der Verteilung der Gesamtheit und die Stichprobe wird repräsentativ. Es ist also bei der Stichprobenentnahme zu beachten, dass eine genügende Anzahl von Spanteilchen analysiert wird, damit ein aussagekräftiges Ergebnis erzielt werden kann [93].

3 Versuchseinrichtungen

Die Durchführung der Untersuchungen in dieser Arbeit unterteilt sich im Wesentlichen in zwei Bereiche. Zum einen erfolgen Grundlagenuntersuchungen unter Parametervariation für das umschlingende Verfahren und zum anderen werden die dabei angefallenen Späne klassifiziert. Mit den ermittelten Daten soll ein Modell erstellt werden, um eine Vorhersage der Trennzeit für Seilsägearbeiten, in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussparametern, zu ermöglichen.

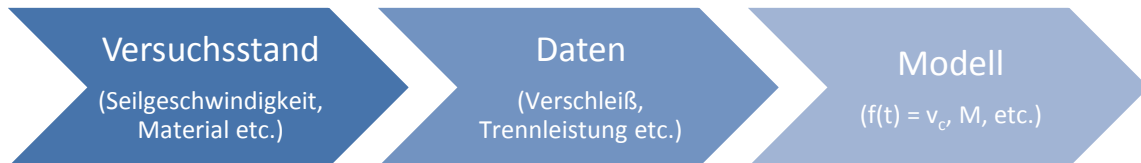


Abbildung 42: Graphische Ablaufdarstellung

3.1 Aufbau Seilsäge Versuchsstand

Für die Grundlagenuntersuchungen für das umschlingende Verfahren wurde zu Beginn ein Versuchsstand samt Messverfahren und Sensorik konzipiert, dimensioniert und gebaut.

3.1.1 Seilsäge

Die Versuche werden mit einer Seilsäge des Typs DS-WS 15 der Firma Hilti Corporation durchgeführt. Abbildung 43 zeigt die Grundausrüstung der Seilsäge mit dem dazugehörigen Antrieb, dem Steuerpult, einem pneumatischen Kompressor und zwei Böcken, an denen Umlenkrollen befestigt sind. Die DS-WS 15 ist eine elektrisch betriebene Seilsäge, mit der mittels Diamantseilen Bauteile aus bewehrtem Beton, Mauerwerk oder auch Stahl getrennt werden können.



Abbildung 43: Seilsäge DS-WS 15 der Firma Hilti Corporation [94]

Der Seilantrieb erfolgt über zwei mit Antriebsrädern versehene Elektromotoren. Diese besitzen eine Nennleistung von jeweils 7,5 kW, in Summe somit 15 kW Antriebsleistung. Der Durchmesser der Antriebsräder beträgt jeweils 280 mm. Das Diamantseil wird in Form einer Acht um die Antriebsräder geführt, was zu einer optimalen Umschlingung und damit

optimalen Traktion führt. Die Antriebsräder sind genauso wie die Umlenkrollen mit Gummi ummantelt, so dass die Diamanten zwar in diesen eindringen, der Gummi sich allerdings überwiegend nur im elastischen Verformungsbereich befindet und somit nur geringen Abtrag bewirkt. Die Motoren-Kennlinie und Steuerung sind so konzipiert, dass ein hohes Anzugs- und Arbeitsmoment erzielt wird. Die Seilgeschwindigkeit kann stufenlos von 0 m/s bis 27 m/s eingestellt werden. Dies stellt gegenüber hydraulischen Antrieben einen großen Vorteil dar, da hier nur, bedingt durch die Durchflussmenge, in verschiedenen Geschwindigkeitsstufen gefahren werden kann.

Neben dem Antrieb ist das Aufbringen des Vorschubs von großer Bedeutung. Über den Kompressor werden zwei Pneumatikzylinder angesteuert, die die gewünschte Seilkraft aufbringen und diese Kraft konstant halten. Der Vorschub wird somit kraftgesteuert. Durch die Seilkraft wird mit Hilfe des Winkels, der durch die Krümmung des Diamantseils auftritt, die Normalkraft, die auf das Werkstück wirkt, erzeugt. Die Pneumatikzylinder besitzen einen Durchmesser von 80 mm beziehungsweise 100 mm und sind zwischen den beiden Antriebsrädern und dem Seilspeicher befestigt. Durch die Druckregelung der Pneumatikzylinder wird ein konstanter Vorschub gewährleistet. Die DS-WS 15 besitzt nachfolgende technische Daten.

Tabelle 2: Technische Daten der DS-WS 15 [94]

Antrieb (versorgt und gesteuert vom Steuerpult)	
Antriebsart	elektrisch
Nennleistung	15 kW (2 x 7,5 kW)
Seilgeschwindigkeit	0 m/s - 27 m/s
Seilspeicher im Antrieb	Minimal 3,2 m; Maximal 9,2 m
Abmessungen	1560 mm x 790 mm x 920 mm
Gewicht	ca. 266 kg
Schutzklasse	IP 65
Steuerpult	
Nennspannung	400 V – 50/60 Hz 3P+N+PE oder 3P+PE
Kompressor	
Druckluft	min. 6 bar
Luftmenge	min. 100 l/min
Anschluss	230 V

3.1.2 Wasserbecken

Für eine optimale Kühlung und um den Sägeprozess beobachten zu können, wird ein Wasserbecken aus transparentem Plexiglas angefertigt. Die Sicht auf den Trennprozess ist schon nach sehr kurzer Zeit eingeschränkt, da sich das Wasser stark eintrübt. Das Wasserbecken besitzt eine Höhe von 1.380 mm und einen rechteckigen Grundriss mit den Abmessungen 700 mm auf 1.300 mm. Das Diamantseil befördert Wasser, das zwischen die Diamantsegmente gelangt und wieder durch die Zentrifugalkraft bei der nächsten Umlenkrolle gelöst wird. Dieser Umstand setzt voraus, dass das Wasserbecken so wenig Durchdringungsstellen besitzt wie möglich, damit das aufspritzende Wasser das Becken nicht verlässt.

Der Wasserstand wurde so hoch gewählt, dass das Werkstück vollständig im Wasser liegt. Um dem Wasserschwind, der während des Trennprozesses eintritt entgegenzuwirken,

wurden zusätzlich ein bis zwei Zentimeter ab der Oberkante des Werkstücks nachgefüllt. Dadurch ist das Werkstück immer unterhalb des Wasserspiegels, jedoch verbleiben die Umlenkrollen, die das Diamantseil auf das Werkstück leiten, außerhalb des Wassers. Das Plexiglas besitzt eine Stärke von 20 mm, um bei den auftretenden Seilrissen, die eine erhebliche Schlagwirkung mit sich bringen können, nicht zu zerspringen. Zusätzlich ist das Becken von einem rostfreien Edelstahlkäfig ummantelt, der die Stabilität des kompletten Wasserbeckens weiter erhöht.

3.1.3 Wechsellvorrichtung

Um die Werkstücke nach erfolgreichem Schnitt auszuwechseln, wurde eine leicht zu entfernende Wechsellvorrichtung als Halterung für die Werkstücke konstruiert.



Abbildung 44: Versuchstand mit Wasserbecken von vorne

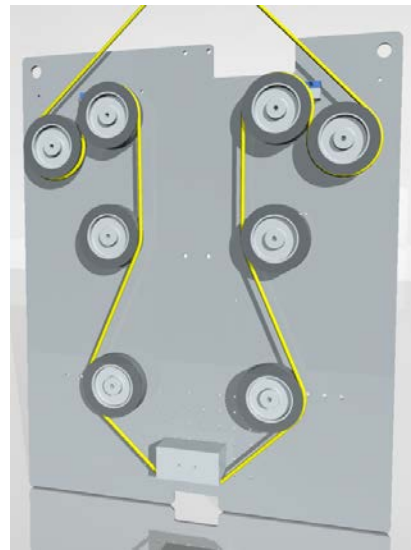


Abbildung 45: CAD Bild der Wechsellvorrichtung mit Seilführung

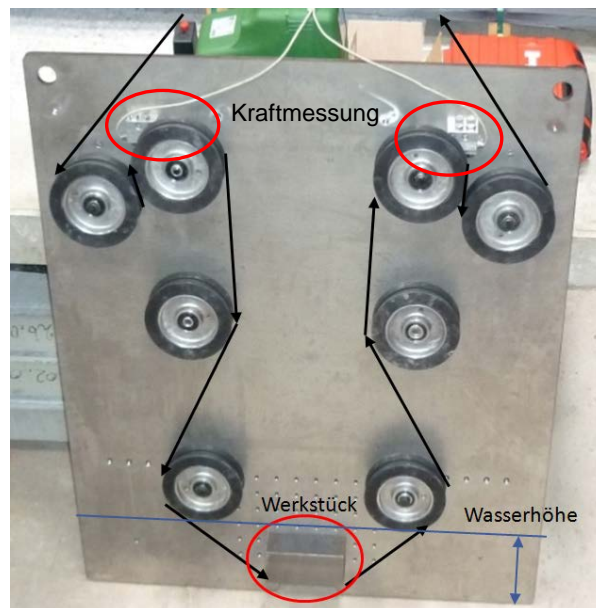


Abbildung 46: Wechsellvorrichtung mit Werkstück, Seilverlauf und Wasserhöhe

An dieser Wechsellvorrichtung wird das Diamantseil anhand von mehreren Umlenkrollen zu dem dort fixierten Werkstück geführt. Die Wechsellvorrichtung ist aus nichtrostendem Stahl, um Korrosion zu vermeiden. Sie besitzt die Abmessungen 1.450 mm auf 1.200 mm und eine Dicke von 12 mm. Die Platte besitzt mehrere Bohrungen, um zum einen die Position der Umlenkrollen und zum anderen die Position des Werkstücks zu verändern. Zu messtechnischen Zwecken ist die Anordnung der Umlenkrollen so gewählt, dass sich eine Umlenkrolle um genau 180° im Eingriff mit dem Diamantseil befindet. Am Boden des Wasserbeckens wurden Fixierhilfen angebracht, um die Wechsellvorrichtung immer an der gleichen Stelle zu positionieren.

3.1.4 Werkzeuge

Für die Untersuchungen wurden konventionelle Diamantseile verwendet, die mit galvanisch beschichteten Diamantsegmenten hergestellt wurden. Aufgrund der hohen Schnittleistung sind galvanische Diamantsegmente zum Trennen metallischer Werkstoffe besser geeignet als Diamantseile mit gesinterten Diamantsegmenten. Die Diamantseile besitzen einen Durchmesser von 10,8 mm. Die Länge eines Diamantsegments l_s beträgt 7 mm und der Abstand zwischen den Diamantsegmenten $l_t = 22$ mm. Dies ergibt pro Meter Diamantseillänge eine Anzahl von ca. 45 Diamantsegmenten, die Segmentierung λ liegt bei 0,32.

Die Diamantseile sind im Neuzustand komplett mit einem Gummi überzogen, das im Verlauf des ersten Versuchs, prozessbedingt an den Diamantsegmenten, entfernt wird. Dies führt zu leichten Verlusten in der Schneidleistung. Für einen Schnitt wird eine Mindestbelegung von 9,5 m Seillänge benötigt. Die Mindestbelegung des Antriebs der Seilsäge beträgt 3,2 m und um das Diamantseil im Wasserbecken und um das Werkstück zu führen, werden weitere 6,3 m benötigt.

3.1.5 Werkstücke

Im Bau- und Abbruchbereich stellen metallische Werkstoffe einen großen Anteil der zu trennenden Materialien dar. Aufgrund der Ausbreitung der Seilsägetechnologie auf diese Tätigkeitsfelder ist das Trennen metallischer Werkstoffe in den Fokus gerückt. Deshalb ist für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit die Kenntnis der Eigenschaften des zu bearbeitenden Werkstoffs von großer Bedeutung. Im Folgenden werden die Materialeigenschaften des metallischen Bauwerkstoffs Stahl und nichtrostendem Stahl beschrieben.

Beim Stahlmaterial handelt es sich um einen vergüteten Baustahl mit höherer Streckgrenze. Die Streckgrenze ist ein Werkstoffkennwert und bezeichnet diejenige Spannung, bis zu der ein Werkstoff bei einachsiger und momentenfreier Zugbeanspruchung keine dauerhafte plastische Verformung zeigt. Hinsichtlich des Einsatzes von Diamantseilsägen zum Rückbau von Stahlstrukturen werden ebenfalls zumeist ferritische Baustähle getrennt. Tabelle 3 zeigt die chemische Zusammensetzung des untersuchten Werkstoffs nach der DIN EN 10025-6 [95].

Bei Bauteilen, die korrosionsbeständig sein sollen, werden hingegen austenitische Stähle eingesetzt. Dies gilt vor allem für Bauteile, die überwiegend mit Wasser oder anderen chemisch reaktionsfreudigen Medien in Kontakt kommen. Der größte Anteil der korrosionsbeständigen Stähle besitzt ein austenitisches Gefüge. Nichtrostende Stähle sind

Stähle mit einem Massenanteil von mindestens 10,5 % Chrom und höchstens 1,2 % Kohlenstoff. Diese sind unmagnetisch und im festen Zustand umwandlungsfrei.

Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung für vergütete Stähle [95]

Bezeichnung	C %	Si %	Mn %	P %	S %	N %	B %	Cr %
	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.
Alle Sorten	0,20	0,80	1,70	0,2	0,01	0,015	0,005	1,50
	Cu %	Mo %	Nb %	Ni %	Ti %	V %	Zr %	
	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	
	0,5	0,70	0,06	2,0	0,05	0,12	0,15	

Der im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Werkstoff hat die Werkstoffnummer 1.4301, auch bekannt als W2A. Er ist ein nichtrostender Stahl und ist zum Zeitpunkt der Anfertigung dieser Arbeit mit einem Produktionsanteil von etwa 33 % der am häufigsten eingesetzte rostfreie Stahl. Es ist ein austenitischer, säurebeständiger 18/10 Cr-Ni-Stahl. Der Werkstoff hat eine hohe Kaltverfestigungsneigung, eine niedrige Wärmeleitfähigkeit und eine hohe Zähigkeit [97]. Tabelle 4 zeigt die chemische Zusammensetzung des Werkstoffs 1.4301 nach DIN EN 10088-3 [96].

Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung für den Werkstoff 1.4301 [96]

Bezeichnung	C %	Si %	Mn %	P %	S %	N %	Ni %	Cr %
	max.	max.	max.	max.	max.	max.		
1.4301	0,07	1,0	2,0	0,045	0,030	0,10	8,0 -10,5	17,5 -19,5

Für die Versuche kommen rechteckige und runde Geometrien, die eine zu trennende Fläche von 20.000 mm² beziehungsweise 20.106 mm² besitzen, zum Einsatz.

Um die genaue Streckgrenze ($R_{p0,2}$) zu ermitteln wurden für beide Werkstoffe insgesamt sechs Zugversuche nach DIN 50125 durchgeführt. Die Bezeichnung für die Zugproben lautet: Zugprobe DIN 50125 - A12x60. Das bedeutet sie wurden nach der Prüfform A mit den Abmessungen $d = 12$ mm und einer Länge von 60 mm gefertigt.

Tabelle 5: Ergebnisse aus Zugversuchen

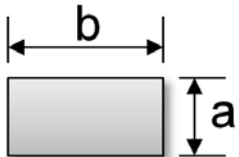
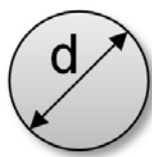
	Nummer	$R_{p0,2}$ [MPa]	$\emptyset R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	$\emptyset R_m$ [MPa]
Vergüteter Baustahl	1	478,00		528,03	
	2	568,91	540,82	597,13	575,84
	3	575,57		602,37	
Nichtrostende Stahl	1	248,14		593,29	
	2	242,72	246,62	580,07	585,17
	3	249,01		582,16	

Erkennbar ist, dass der vergütete Baustahl mit höherer Streckgrenze eine mit durchschnittlich 540,82 MPa mehr als doppelt so hohe Streckgrenze aufweist als der nichtrostende Stahl mit 246,62 MPa. Im Bereich der Zugfestigkeit (R_m) liegt der vergütete Baustahl mit 575,84 MPa innerhalb der Toleranzgrenzen von 550 MPa - 720 MPa. Der nichtrostende Stahl besitzt eine Streckgrenze von durchschnittlich 246,62 MPa und eine

Zugfestigkeit von 585,17 MPa. Zusätzlich sind im Anhang C die Diagramme zu den einzelnen Zugversuchen dargestellt.

Die rechteckigen Werkstücke verfügen über einen Querschnitt von 200 mm auf 100 mm. Die runden Werkstücke haben einen Durchmesser von 160 mm und besitzen dadurch näherungsweise den gleichen Flächeninhalt, es kommt jedoch zu einer Abweichung von ca. 0,5 %. Damit ist eine Vergleichbarkeit der Geometrie zwischen rechteckigen und runden Werkstücken gegeben.

Tabelle 6: Vergleich von rechteckigen und runden Werkstücken

Rechteck	Kreis
	
$A_{\text{Rechteck}} = a \cdot b$	$A_{\text{Kreis}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$
mit den Werten:	
$a = 100 \text{ mm}$ $b = 200 \text{ mm}$	$d = 160 \text{ mm}$
ergibt sich:	
$A_{\text{Rechteck}} = 20.000 \text{ mm}^2$	$A_{\text{Kreis}} \cong 20.106 \text{ mm}^2$

Die rechteckigen Werkstücke werden in zwei Varianten benutzt. So wird während der Versuche zwischen rechteckigen, quer liegenden und die um 90° gedrehte Variante, rechteckigen, hochkant stehenden Werkstücke, unterschieden. Tabelle 6 zeigt ein rechteckiges, quer liegendes Werkstück.

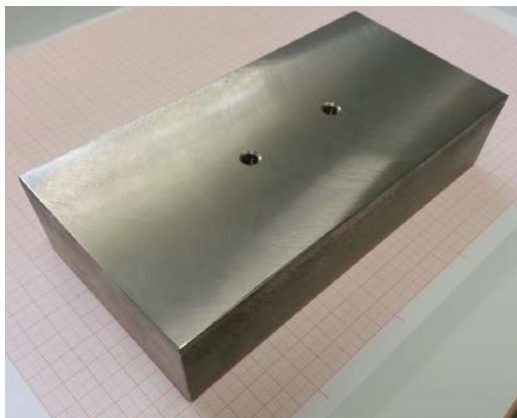


Abbildung 47: Rechteckiges Werkstück

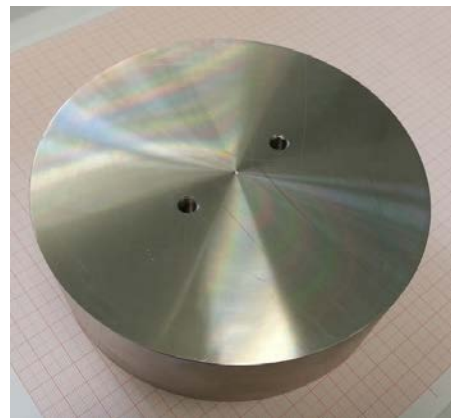


Abbildung 48: Rundes Werkstück

Die Werkstücke werden anhand zweier Schraubverbindungen an der Wechsellvorrichtung fixiert. Die Bohrungen, die dafür benötigt werden, sind am Werkstück durchgehend, wodurch sich die zu trennende Fläche minimal verkleinert. Die Schrauben sind jedoch in der Länge so kurz gewählt, dass sie am Trennprozess nicht beteiligt sind.

Um den Produktionsaufwand und den Verschnitt zu reduzieren, wurden die Werkstücke so ausgelegt, dass zwei Schnitte pro Werkstück möglich sind. Da der Trennprozess immer in

der gleichen Ebene erfolgt, muss beim zweiten Schnitt das Werkstück um die Differenz des zuvor abgeschnittenen Teils mit Hilfe eines Abstandhalters unterbaut werden. Abbildung 49 zeigt die Seitenansicht eines Werkstücks.

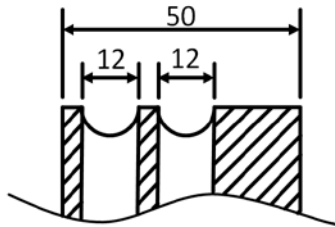


Abbildung 49: Seitenansicht auf das Werkstück zur Veranschaulichung der zwei mit dem Diamantseil erzeugbaren Schnittfugen



Abbildung 50: Erster Schnitt eines noch unvollständig getrennten Werkstücks

Die Probentiefe wurde auf 50 mm festgelegt, so dass hier bei einer Schnittbreite von maximal 12 mm zwei Schnitte, ohne zusätzlich die Schrauben zu trennen, durchgeführt werden können. Bei dieser Tiefe von 50 mm liegt das Gewicht des Werkstücks bei ca. 7,9 kg und bleibt dadurch von einer Person handhabbar. Die Geometrie der Werkstücke ist materialunabhängig. Bei Stahl werden die gleichen Abmessungen verwendet wie bei nichtrostendem Stahl.

3.2 Messtechnik

Zur Beurteilung des Trennprozesses werden die auftretenden Prozesskräfte, die beispielsweise an den Umlenkrollen anliegen, und die resultierende Schnittzeit gemessen und analysiert. Anhand der Schnittzeit wird die Schnittleistung berechnet. Ebenso werden die angefallenen Späne untersucht und klassifiziert. Die dazu benötigte Messtechnik wird im Folgenden genauer betrachtet.

3.2.1 Siebeinrichtungen

3.2.1.1 Analysiesiebmaschine

Um die angefallenen Späne in ihrer Größe zu klassifizieren, kam eine Analysiesiebmaschine des Typs AS 200 control der Firma Retsch GmbH zum Einsatz. Die Analysiesiebmaschinen der Reihe AS 200 werden in den Bereichen Forschung & Entwicklung, Qualitätskontrolle von Rohstoffen, Zwischen- und Endprodukten sowie zur Produktionsüberwachung eingesetzt. Der geregelte elektromagnetische Antrieb ermöglicht die optimale Anpassung an jedes Siebgut. Selbst bei kurzen Siebzeiten erzeugt das Gerät eine hohe Trennschärfe.

Die AS 200 control besitzt wegen der digitalen Parametereinstellung eine hohe Genauigkeit. Sie ist geeignet für Nasssiebungen, wie sie für die Klassifizierung der Späne zum Einsatz kam. Die Wurfbewegung erfolgt dreidimensional, so dass eine optimale Ausnutzung der offenen Siebfläche ermöglicht wird und das Siebgut gleichmäßig über die gesamte Siebfläche wandert. Weitere Vorteile der Analysiesiebmaschine sind der Intervalleinsatz und

der geräusch- und wartungsarme Betrieb [98]. Sie erfüllt die Voraussetzung für die Prüfmittelüberwachung gemäß DIN EN ISO 9000 ff [99].



Abbildung 51: Analysesiebmaschine AS 200 control der Firma Retsch GmbH [98]



Abbildung 52: Präzisionswaage der Firma Mettler Toledo GmbH

Nach erfolgreichem Trennprozess werden die angefallenen Späne aus dem Wasserbecken herausgesaugt. Aus der Gesamtmasse der angefallenen Späne wird eine Stichprobe von ca. 70 g entnommen. Da die Partikel einen relativ geringen Durchmesser besitzen, neigen sie zur Agglomeration. Aufgrund dessen werden sie durch eine Nasssiebung klassifiziert. Als Parameter für die Klassifizierung wurde ein 10-Sekunden Intervallbetrieb bei einer Standardamplitude von 1 mm pro Erdbeschleunigung g für eine Gesamtdauer von 10 Minuten gewählt. Nach Trocknung der klassifizierten Späne im Sieb erfolgt die Massenmessung mit einer Präzisionswaage.

Die genutzten Analysesiebe stammen ebenfalls von der Firma Retsch GmbH. Es handelt sich dabei um Analysesiebe aus nichtrostende Stahl mit einem Durchmesser von 200 mm und einer Höhe von 50 mm. Der Siebboden besteht aus einem rostfreien quadratischen Drahtsiebgewebe. Die Analysesiebe besitzen eine hohe Korrosionsbeständigkeit und lassen sich in einem Ultraschallbad leicht reinigen. Die Maschenweite der in dieser Arbeit eingesetzten Analysesiebreihe betrug:

- 500 μm
- 400 μm
- 315 μm
- 250 μm
- 180 μm
- 125 μm
- 80 μm
- 32 μm

Diese Siebreihe wurde anhand von Voruntersuchungen festgelegt, da kein Span einen größeren Durchmesser als 500 μm aufwies und ein Großteil der Gesamtspanmenge sich im Bereich 125 μm - 180 μm befand. Siebgut kleiner 63 μm ist nur noch bedingt nachzuweisen und würde ein separates Verfahren erfordern. Aufgrund der geringen Menge in diesem Bereich wurde jedoch darauf verzichtet.

3.2.1.2 Präzisionswaage

Als elektronische Präzisionswaage kam eine XS603SDR der Firma Mettler Toledo GmbH zur Anwendung. Abbildung 52 zeigt die Waage. Sie verfügt über eine vollautomatische Justierung und Kalibrierung namens "FACT" mit internem Gewicht, sowie eine eingebaute Applikationen für normale Wägungen, Statistik, Rezeptieren, Stückzählung, Prozentwägen, Dichte und dynamisches Wägen. Ebenfalls besitzt sie ein berührungssensitives Terminal für eine einfache Bedienung sowie einen Glaswindschutz, der hochpräzise Messungen ermöglicht. Der Höchstlastbereich liegt für eine Genauigkeit von 10 mg bei 610 g und für eine Genauigkeit von 1 mg bei 120 g, was als ausreichend für den Einsatz der Spannwiegung angesehen werden kann [100].

Nach der Siebung werden die Analysesiebe getrocknet und der Inhalt wird auf der Präzisionswaage gewogen. Wird der Massenanteil aufgetragen über den einzelnen Maschenweiten ergibt sich eine aussagekräftige Körnungslinie.

3.2.2 Messeinrichtungen am Seilsägeversuchstand

3.2.2.1 Sensoren

3.2.2.1.1 Biegebalken

Um die auftretenden Kräfte, die bei der Bearbeitung der Werkstücke durch die Seilsäge entstehen, aufzunehmen, sind am Versuchstand Sensoren der Firma HKM-Messtechnik GmbH angebracht. Es handelt sich dabei um Scherkraftaufnehmer, die mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen Zug- und Druckkräfte messen können. Die Scherkraftaufnehmer eignen sich insbesondere für die Anwendung in einer stark beanspruchten Umgebung, wie sie das Wasserbecken während des Trennprozesses darstellt.



Abbildung 53: Scherkraftaufnehmer [101]



Abbildung 54: Scherkraftwägezelle [101]



Abbildung 55: Drehwinkelsensor [102]

Die beiden eingesetzten Scherkraftaufnehmer vom Typ SK 1.0 besitzen eine Nennlast von 2 kN, was für den zu messenden Bereich ausreichend dimensioniert ist. Die Genauigkeit der Scherkraftaufnehmer liegt bei $\pm 0,25\%$. Sie sind mit einem integrierten Messverstärker ausgestattet und ihr Gehäuse ist aus Aluminium gefertigt und erfüllt die Schutzart IP 67 [101]. Wie die beiden Scherkraftaufnehmer am Versuchstand verbaut wurden, ist Abbildung 56 zu entnehmen.

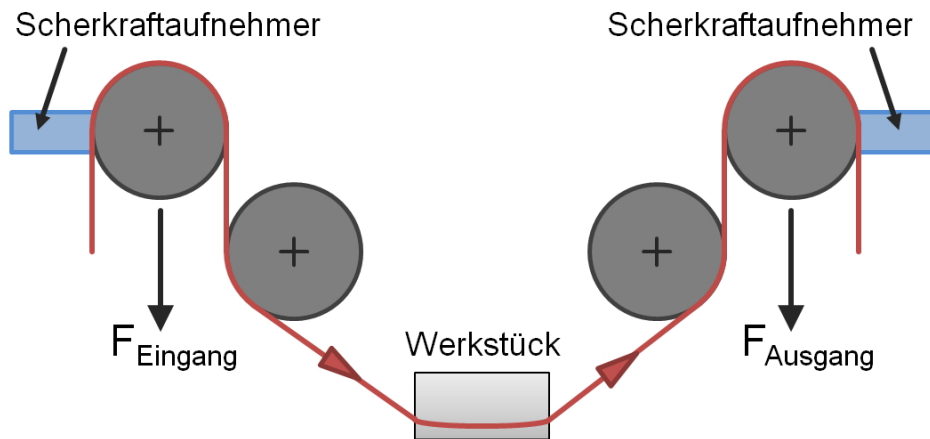


Abbildung 56: Schematische Darstellung der Eingriffssituation an den Scherkraftaufnehmern

An den Scherkraftaufnehmern werden Umlenkrollen befestigt, so dass sich das Diamantseil genau 180° im Eingriff befindet. Somit kann die genaue Kraft aufgenommen werden, die jeweils durch das Diamantseil an dem Werkstück anliegt. Da sich die Kraft auf der Eingangsseite, an jener Stelle, an der das Diamantseil auf das Werkstück trifft, stark von der Ausgangsseite, in der das Diamantseil das Werkstück wieder verlässt, unterscheidet, müssen beide Seiten durch Scherkraftaufnehmer abgedeckt werden. Bedingt durch den Vorschub herrscht am Diamantseil lokal zwischen der Ausgangsseite und dem Antriebspunkt die höchste Spannung. Hinzu kommen Verluste an den beiden mittleren Umlenkrollen zwischen F_{Eingang} und F_{Ausgang} , die durch die Reibung im Kugellager entstehen, die jedoch aufgrund ihrer geringen Eingriffslänge als vernachlässigbar angenommen werden.

3.2.2.1.2 Scherkraftwägezelle

Ebenfalls wurden von der Firma HKM-Messtechnik GmbH Scherkraftwägezellen für die zusätzlichen Versuche (siehe Kapitel 5) eingesetzt, um die auftretenden Kräfte, die bei der Bearbeitung von partiellen Werkstücken entstehen, aufzunehmen. Die S-förmigen Scherkraftwägezellen sind symmetrisch aufgebaut und verfügen über eine zentrische Krafteinleitung. Sie sind alle gleichermaßen unempfindlich gegen Seitenkräfte. Wie bei dem Scherkraftaufnehmer werden anhand von Dehnungsmessstreifen, die auf einem Balken angeordnet sind, Zug- und Druckkräfte messbar.

Die fünf eingesetzten Scherkraftwägezellen vom Typ SW 1.1 besitzen eine Nennlast von 1 kN. Die Genauigkeit der Scherkraftaufnehmer liegt bei $\pm 0,25\%$. Sie sind mit einem integrierten Messverstärker ausgestattet, besitzen ein Gehäuse aus Aluminium und erfüllen die Schutzart IP 67 [101].

3.2.2.1.3 Drehwinkelsensor

Als Drehwinkelsensor kam das Modell SP2800 der Firma Variomh Eurosensor zum Einsatz. Es handelt sich um einen potentiometrischen Sensor, der in einem Duroplastgehäuse mit einem Durchmesser von 28 mm untergebracht ist. Über eine Welle, die 6 mm aus dem Gehäuse herausragt, kann der Winkel erfasst werden. Der Messbereich des eingesetzten Sensors beträgt 0° bis 100° . Wie die Scherkraftaufnehmer erfüllt der Sensor die Schutzart IP 67 [102].

3.2.2.2 Datenerfassung

Neben den Scherkraftaufnehmern an der Wechsellvorrichtung werden noch andere Parameter erfasst. Abbildung 57 zeigt alle aufgenommenen Parameter am Versuchstand.

Um die Wassertemperatur im Becken während des Trennprozesses zu erfassen, kommt ein Thermometer zum Einsatz. Über eine Wegmessung in Form eines Wegseilsensors kann der Verfahrweg des Pneumatikzylinders, der den Vorschub erzeugt, während des Trennprozesses dokumentiert werden. Um die tatsächliche Geschwindigkeit zu ermitteln, wurde ein induktiver Drehzahlsensor an einer Umlenkrolle angebracht.

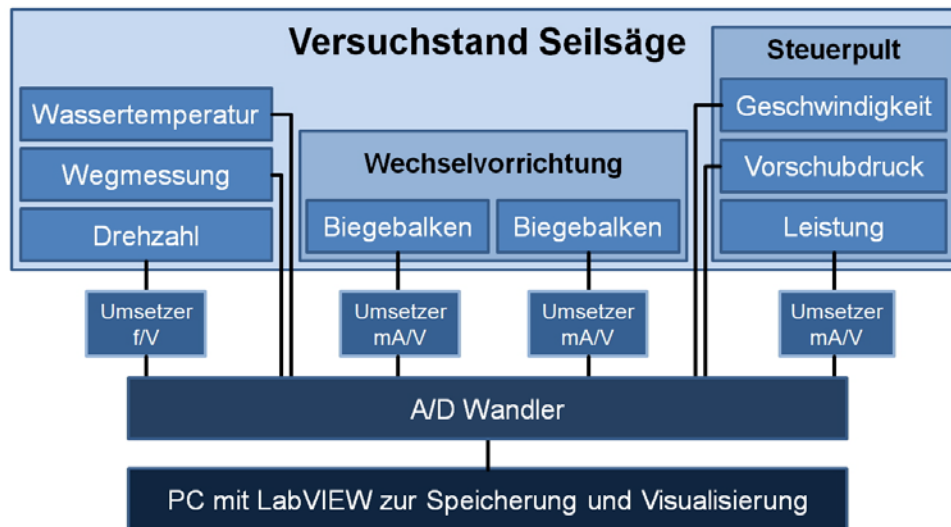


Abbildung 57: Prinzipskizze der Messtechnik am Seilsägeversuchstand

Am Steuerpult wird ebenfalls die Seilgeschwindigkeit angezeigt und aufgenommen, jedoch liefert die Messung mit dem induktiven Drehzahlsensor an der Umlenkrolle genauere Werte. Ebenfalls wird am Steuerpult die abgegebene Leistung der beiden Elektromotoren erfasst. Zusätzlich wird am Steuerpult der Vorschub über den auf die Pneumatikzylinder aufgebrauchten Luftdruck eingestellt.

Um den genauen Luftdruck zu erhalten, ist an der Verbindungsleitung zwischen Steuerpult und Pneumatikzylinder ein Drucksensor angebracht, der den tatsächlich anliegenden Druck detektiert. Die aufgenommenen Signale werden teilweise über Umsetzer an den A/D Wandler (NI USB-6218) der Firma National Instruments gesendet und über eine USB Schnittstelle an den PC zur Weiterverarbeitung geleitet.

3.2.2.3 LabView

Die Daten, die der A/D Wandler an den PC sendet, werden über das Programm LabView der Firma National Instruments aufgenommen. Bei LabView handelt es sich um eine Plattform zur grafischen Programmierung. Durch die Software können die Signale kalibriert werden. Über eine selbst erstellte grafische Benutzeroberfläche können die gewünschten Signale in Echtzeit angezeigt werden. Ebenfalls bietet das Programm eine Filterung der ankommenden Signale. Die unterschiedlichen gefilterten Signale werden in Listen abgespeichert, so dass sie später genau analysiert werden können.

Um noch handhabbare Datenmengen zu erhalten, wurden die Signale, unter Berücksichtigung des Nyquist-Shannon-Abtasttheorems, mit der Abtastrate von 1 Hz abgetastet. Das Abtasttheorem besagt, dass ein auf f_{max} bandbegrenztetes Signal mit einer Frequenz von mindestens $2 \cdot f_{max}$ abgetastet werden muss, damit man es aus dem zeitdiskreten Signal wieder exakt rekonstruieren kann. Die Vorversuche haben gezeigt, dass die Abtastrate der Signale mit 1 Hz als ausreichend angesehen werden kann. Gerade bei länger dauernden Schnitten steigt mit einer höheren Abtastrate die Datengröße schnell an, jedoch ist der resultierende Mehrwert durch die Zusatzinformationen nicht gegeben.

3.3 Systemparameter

Um das System Seilsäge zu modellieren, müssen die Systemparameter, die auf das System wirken (Input) und diejenigen, die von dem System ausgehen (Output), genau betrachtet werden. Die in Abbildung 58 aufgelisteten Systemparameter gelten für das umschlingende Verfahren.

3.3.1 Eingangsparameter

Als wichtiger Eingangsparameter ist die Geometrie des Werkstücks zu nennen. Anhand der Geometrie wird der Verlauf des späteren Trennprozesses vorbestimmt. Auf die Geometrie des Werkstücks hat der Anwender oft keinen Einfluss, da sie in den meisten Anwendungen schon vorgegeben ist. Jedoch besteht Einflussnahme auf die Schnitttrichtung. So kann ein rechteckiges Werkstück der Höhe nach von oben nach unten oder quer, also um 90° gedreht, beispielsweise von links nach rechts getrennt werden. Zur Quantifizierung dieser Unterschiede existiert bisher noch kein wissenschaftlicher Kenntnisstand.

Ein anderer signifikanter Einflussparameter ist natürlich das Material des zu trennenden Werkstücks. Es existiert ein großer Unterschied im Trennprozess, wenn das Werkstück aus sprödem oder duktilem Material besteht.

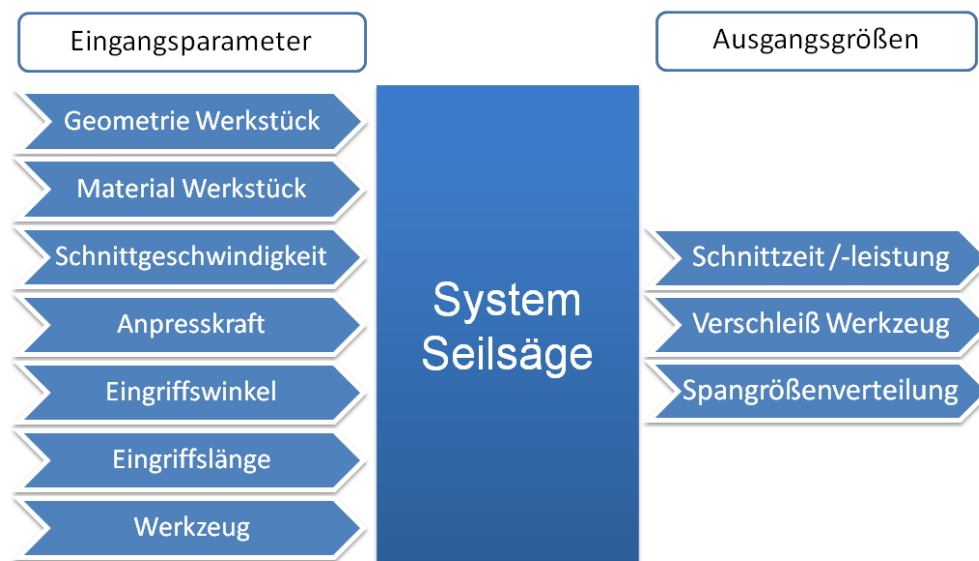


Abbildung 58: Eingangsparameter und Ausgangsgrößen für eine Seilsäge

Als an der Seilsäge einstellbare Prozessparameter sind die Schnittgeschwindigkeit und die Anpresskraft, die durch den Vorschubdruck erwirkt wird, zu nennen. Die

Schnittgeschwindigkeit gibt an, mit was für einer Geschwindigkeit das Diamantseil über das Werkstück läuft. Je schneller es läuft, desto schneller geht der Trennprozess vonstatten. Mit der Anpresskraft verhält es sich ähnlich. Sie gibt den Vorschub des Diamantseils an. Je größer der Vorschub, desto schneller der Trennprozess.

Der Winkel, unter dem das Diamantseil in das Werkzeug trifft, ist ebenfalls eine wichtige Einstellgröße. Je größer der Winkel, desto höher steigt die aufgebrachte Normalkraft F_N (siehe Abbildung 36) an. Je höher diese Normalkraft ausfällt, desto mehr wird das Diamantseil an das Werkstück gedrückt, was zu einem größeren Abtrag führt.

Die Eingriffslänge des Diamantseils im Werkstück ist ebenfalls ein bedeutender Einflussparameter auf den Trennprozess. Wenn der Vorschubdruck konstant gehalten wird, wirkt auf die Diamantsegmente vor allem zu Beginn des Schnittes eine höhere Kraft. Bedingt wird dies durch eine nur kurze Eingriffslänge des Diamantseils, die wiederum durch Kanten hervorgerufen wird. Bei einer längeren Eingriffslänge verteilt sich der Druck auf mehrere Diamantsegmente und dadurch sinkt die spezifische Kraft, die auf ein Segment wirkt. Dies lässt sich leicht nach der Formel

$$F = p \cdot A \quad (7)$$

darstellen. Bleibt der Druck (p) konstant und verringert sich die Fläche (A), muss zwangsläufig die Kraft (F) ansteigen [103].

Als letzter, allerdings wichtiger Einflussparameter, ist das Diamantseil als Werkzeug selbst zu nennen. Neben der Herstellungsart der Diamantsegmente, ihrem Durchmesser und der Anzahl der Diamantsegmentbelegung auf dem Seil ist der Verschleißzustand des Seils von großem Einfluss. Ein schon im Trennprozess aktiv gewesenes Diamantseil hat natürlich immer eine kürzere Standzeit als ein vergleichbares neuwertiges Diamantseil.

Der Grad der Verdrillung zählt ebenfalls zum Einflussparameter des Werkzeugs. In der Praxis werden die Diamantseile vor dem Bearbeitungsprozess mit jeweils einer 360° Drehung pro laufendem Meter Diamantseil in sich verdrillt, um einen einseitigen Verschleiß am Diamantsegment zu verhindern und den vollumfänglichen Eingriff des Diamantsegmentes mit dem Werkstück zu ermöglichen. Was für eine Auswirkung dieser Effekt besitzt, ist unklar und wird in dieser Arbeit untersucht.

3.3.2 Ausgangsgrößen

Beim Trennprozess mit der Seilsäge entstehen natürlich auch Ausgangsgrößen. Die Ausgangsgrößen werden bestimmt durch die Eingangsparameter, die in unterschiedlichen Kombinationen in unterschiedlichen Ausgangsgrößen resultieren.

Zu den wichtigsten Ausgangsgrößen zählt die Schnittleistung, die angibt, wie effektiv das Verfahren ist. Da die in dieser Arbeit zu trennende Werkstückfläche immer genau definiert ist, kann direkt von der ermittelten Schnittzeit auf die Leistung geschlossen werden. Es gilt folgende Formel:

$$P_{\text{Schneidleistung}} = \frac{A_{\text{Schnittfläche}}}{t_{\text{Trennzeit}}} \quad (8)$$

Bleibt die Fläche ($A_{\text{Schnittfläche}}$) konstant, so ergibt sich eine Proportionalität zwischen der Trennzeit ($t_{\text{Trennzeit}}$) und der Schneidleistung ($P_{\text{Schneidleistung}}$).

Ebenfalls als Ausgangsgröße ist der entstandene Span aufzuzählen. Anhand der Spangrößenverteilung können Rückschlüsse auf die Eingangsparameter und auf die Qualität des Trennprozess getroffen werden.

Eine andere wichtige aus dem Trennprozess resultierende Ausgangsgröße ist der Verschleiß, der am Werkzeug entsteht. Je nach Eingangsparameter können hier signifikante Unterschiede im Verschleißverhalten der Diamantseile auftreten. Zur Verschleißmessung an Diamantseilen bestehen in der Praxis nur eingeschränkte Möglichkeiten, die nachfolgend vorgestellt werden:

- **Messen der Durchmesseränderung**

Bei dieser Methode wird der Durchmesser der Diamantsegmente mit einem handelsüblichen Messschieber gemessen. Bedingt durch den auftretenden Verschleiß wird der Durchmesser an den Diamantsegmenten mit der Zeit immer kleiner. Ebenfalls kann durch diese Methode die sich mit der Zeit entwickelnde Konizität des Diamantsegments gemessen werden. Durch die vorgegebene Laufrichtung des Diamantseils erfährt die vordere Kante des Segments eine höhere Beanspruchung und weist deshalb mit fortschreitender Einsatzzeit einen höheren Verschleiß auf. Die Messung muss somit im vorderen Bereich als auch im hinteren Bereich des Segments durchgeführt werden. Bei dieser Methode wird jedoch nicht das Zusetzen der Diamantsegmente durch Späne oder andere Partikel berücksichtigt, die sich negativ auf die Schnittleistung auswirken.

- **Optische Sichtkontrolle**

Hierbei wird die Güte des Diamantsegments nur anhand des optischen Erscheinungsbilds bestimmt. Dabei spielen die empirischen Kenntnisse des Bedienpersonals eine übergeordnete Rolle, die die Qualität der Begutachtung einer breiten Varianz unterwirft. Aber auch bei sehr gutem Kenntnisstand des Operators ist diese Methode nur bedingt aussagekräftig, da die optische Kontrolle nur begrenzt Rückschlüsse auf den Werkzeugzustand zulässt. Schlussendlich können nur qualitative Aussagen getroffen werden.

- **Optische Untersuchung der Oberflächentopographie**

Über eine Analyse der Werkzeugoberfläche können detaillierte Aussagen zur Oberflächentopographie eines Diamantsegments getroffen werden. Damit verbunden ist jedoch ein hoher Aufwand, da das Seil zu dem meist stationären Messgerät gebracht werden muss. Für solche Oberflächenmessgeräte fallen hohe Fixkosten an und meist sind sie nur von geschultem Fachpersonal bedienbar. Die Methode liefert zwar genaue Werte, ist jedoch in der Praxis nur unter sehr hohem Arbeitseinsatz anwendbar. Die Kosten stehen hier in keiner Relation zum Nutzen.

Alle genannten Verfahren liefern entweder nur ungenaue Ergebnisse oder sind nur mit sehr hohem Aufwand anwendbar. Hier besteht Entwicklungsbedarf, um vor Ort einfach und schnell zuverlässige Werte zu erhalten [57].

3.4 Einflussmatrix

Die Einflussparameter auf das System Seilsäge im umschlingenden Verfahren sind zahlreich und nur unter hohem Versuchsaufwand zu isolieren. Um im Rahmen einer wissenschaftlichen Untersuchung erste Ergebnisse zu erzielen, musste eine Vorabschätzung auf die Größe der Einflussnahme der einzelnen Faktoren gemacht werden. Diese Vorabschätzung wurde anhand einer Vester Einflussmatrix vorgenommen.

Eine Einflussmatrix ermöglicht die realitätsgetreue visuelle Darstellung komplexer Zusammenhänge und kann dadurch als wichtiges Entscheidungshilfsmittel dienen, um die Möglichkeiten von Einflussnahmen und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem abzuschätzen. Die Idee der Einflussmatrix geht dabei auf den „Vester'schen Papiercomputer“ zurück. Frederic Vester entwickelte 1970 den Papiercomputer als grafisches Hilfsmittel zur Herstellung von Verbindungen zwischen verschiedenen Einflussgrößen nach vermuteter Ursache-Wirkung-Beziehung [104].

Anhand der Matrix kann festgestellt werden, was für eine Einflussgröße verändert werden muss, um ein bestimmtes Ergebnis zu erreichen. Im Fall der Seilsäge kann anhand der Einflussmatrix erkannt werden, was für Einflussparameter, die sich mitunter gegenseitig beeinflussen, den größten Einfluss auf das Gesamtsystem erwirken. Zur Erstellung der Einflussmatrix müssen bestimmte Rahmenbedingungen erfüllt sein. Zuerst muss eine Tabelle nach folgendem Schema erstellt werden.

In der ersten Spalte werden in die Zeilen die verschiedenen Einflussfaktoren geschrieben. Die gleichen Einflussfaktoren werden ebenfalls in die erste Zeile eingetragen. Nun wird anhand einer Gewichtung ermittelt, wie stark beispielsweise der 1. Einflussfaktor auf den 2. Einflussfaktor einwirkt. In Tabelle 7 wäre beispielsweise der Einfluss des Faktors 1 (Reihe) auf den 2. Faktor (Spalte) mit einer 1 gewichtet. Da die jeweiligen Einflussfaktoren nicht auf sich selbst wirken können, wird die Tabelle diagonal geteilt. Die Gewichtung kann anhand verschiedener festgelegter Skalen erfolgen, meist wird jedoch die Skala von 0 - 4 genutzt. Die 0 steht dabei für keinen Einfluss, die 1 für schwachen, die 2 für verminderten, die 3 für verstärkten und die 4 für starken Einfluss.

Tabelle 7: Schema der Datenbasis einer Einflussmatrix

auf								Kumulierte Einflussstärke
Einfluss von	1	2	3	4	...	n		
1.Einflussfaktor	-	1	0	0	...	0		1
2.Einflussfaktor	0	-	0	0	...	0		0
3.Einflussfaktor	0	2	-	3	...	0		5
4.Einflussfaktor	0	0	0	-	...	0		0
...	-
n-ter Einflussfaktor	0	0	0	0	...	-		0
Kumulierte Beeinflussbarkeit	0	3	0	3	...	0		-

Nachdem die Einflussfaktoren untereinander gewichtet wurden, werden die jeweiligen Zahlen in Zeilen- und in Spaltenrichtung aufsummiert. In der Aufsummierung der Zeilen ist

die Einflussstärke abzulesen. Je höher der Wert, desto größer ist die Einflussstärke auf die anderen Faktoren. In der Aufsummierung der Spalten kann auf die Beeinflussbarkeit der verschiedenen Einflussfaktoren rückgeschlossen werden.

In Tabelle 7 beispielsweise hat der 1. Einflussfaktor eine sehr schwache Einflussstärke (Wert 1) auf die anderen Faktoren, der 3. Einflussfaktor besitzt die größte Einflussstärke (Wert 5). In der untersten Zeile werden die Einflussfaktoren gewertet, die die höchste Beeinflussbarkeit aufweisen. So sind die Faktoren 2 und 4 die am stärksten beeinflussbaren Faktoren (Wert 3).

Aus dieser tabellarischen Darstellung wird im nächsten Schritt die Einflussmatrix ermittelt. Dazu wird, wie in Abbildung 59 dargestellt, die Einflussstärke über der Beeinflussbarkeit aufgetragen.

So hat beispielsweise der Einflussfaktor 1 die Koordinaten (1/0), da er eine Einflussstärke von 1 und eine Beeinflussbarkeit von 0 besitzt. Je weiter der Wert auf der x-Achse steigt, desto höher ist seine Einflussstärke, desto aktiver ist er. Besitzt der Faktor kleine x-Werte und hohe y-Werte, so ist er als passiv einzuordnen. Ebenfalls wird zwischen trägen und kritischen Faktoren unterschieden, die jeweils die gleichen x- und y-Werte besitzen. Je höher diese Werte, desto kritischer ist ihr Einfluss auf das Gesamtsystem. Die verschiedenen Einflussfaktoren können nun anhand des Diagramms auf einfache Weise interpretiert werden.

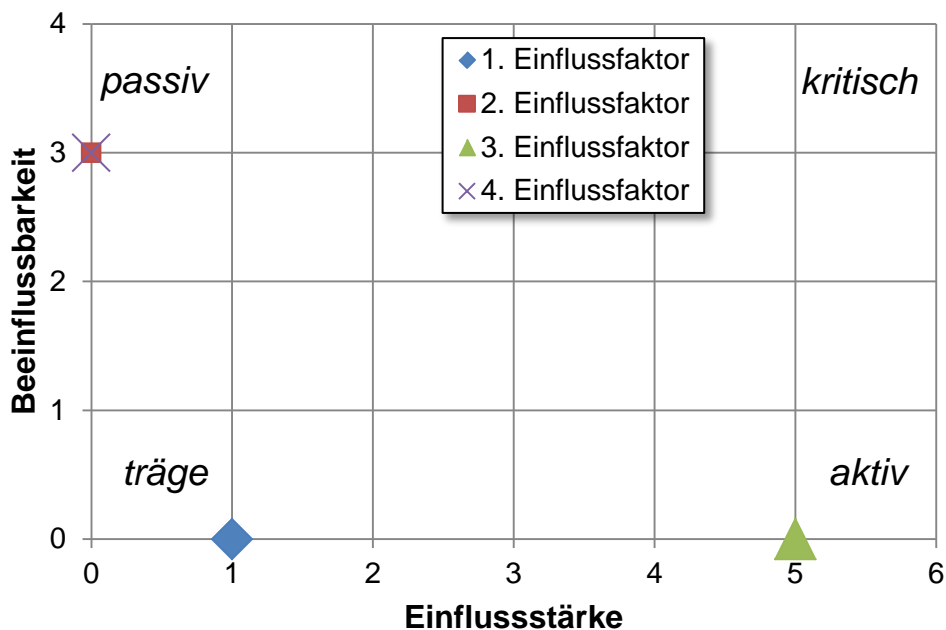


Abbildung 59: Schematisches Beispieldiagramm

Für das Gesamtsystem Seilsäge wurden bereits in Abschnitt 3.3 die Einflussgrößen bei Anwendung des umschlingenden Verfahrens angegeben. In Tabelle 8 sind die verschiedenen Einflussgrößen mit ihrer Gewichtung angegeben. Die Werte wurden anhand von Vorstudien erfasst und diskutiert. In den Vorstudien wurden nach Aufbau des Versuchsstandes mit verschiedenen Parametern, über mehrere Wochen hinweg, eine Vielzahl von Schnitte durchgeführt, um Erkenntnisse zu erlangen, wie viel Zeit beispielsweise bestimmte Querschnitte zum Trennen benötigen. So wurden Schnitte an rechteckigen und runden Werkstücken durchgeführt, sowie die Maschine an die Leistungsgrenze gebracht, um

das Feld für die Parametervariationen abstecken zu können. Desweiteren dienen die Vorversuche dazu, um sich ganz allgemein vertraut zu machen mit der Funktionsweise der Seilsäge, damit während einer späteren Versuchsreihe keine unerwarteten Komplikationen auftreten. Die Vorversuche waren nötig um den Versuchsplan aufstellen zu können und wurden von drei Bedienern der Seilsäge durchgeführt. Die Werte in Tabelle 8 beruhen auf den gewonnenen Erfahrungen dieser drei Bediener. Um die Vollständigkeit der Systemparameter zu wahren, wurden auch die Ausgangsgrößen Schnittzeit, -leistung und Verschleiß mit einbezogen.

Tabelle 8: Datenbasis für das System Seilsäge im umschlingenden Verfahren

auf											
Einfluss von	Geometrie	Material	Schnittgeschwindigkeit	Anpresskraft	Eingriffswinkel	Eingriffslänge	Werkzeug	Spangrößenverteilung	Schnittleistung	Verschleiß	Kumulierte Einflussstärke
Geometrie	-	0	0	3	4	4	0	2	4	4	21
Material	0	-	0	0	0	0	3	4	4	4	15
Schnittgeschwindigkeit	1	0	-	2	0	0	0	4	2	2	11
Anpresskraft	1	0	0	-	1	1	2	4	4	4	17
Eingriffswinkel	0	0	0	4	-	0	0	1	3	3	11
Eingriffslänge	0	0	1	4	0	-	4	2	1	4	16
Werkzeug	0	1	0	2	0	0	-	3	4	1	11
Spangrößenverteilung	0	0	0	0	0	0	0	-	1	1	2
Schnittleistung	0	0	0	0	0	0	0	1	-	2	3
Verschleiß	0	0	0	0	0	0	2	3	3	-	8
Kumulierte Beeinflussbarkeit	2	1	1	15	5	5	11	24	26	25	-

Die kumulierten Werte werden in ein Diagramm übertragen, so dass sie ausgewertet werden können. Abbildung 60 zeigt die von Tabelle 8 erarbeiteten kumulierten Werte. Zur Interpretation der Einflussmatrix werden im Folgenden die in der Matrix eingetragenen Einflussfaktoren näher erläutert. Im nachfolgenden Text werden die Faktoren in Richtung der zunehmenden Einflussstärke beschrieben.

Die Ausgangsgrößen wie Verschleiß, Schnittleistung und Spangrößenverteilung sind sehr passiv. Ihre Beeinflussbarkeit ist logischerweise sehr hoch. Am einflussstärksten von den Werten zeigt sich der Verschleiß des Werkzeugs, da dieser, im Vergleich zu den anderen Ausgangsgrößen, zusätzlich mit dem Ausgangszustand des Werkzeugs verbunden ist.

Das Werkzeug an sich ist im mittleren Bereich der Einflussstärke und im unteren Drittel der Beeinflussbarkeit angesiedelt und somit ein zentraler Einflussfaktor. Es handelt sich beim Werkzeug Diamantseil um eine Einflussgröße, die zwischen träge und kritisch liegt. Dies zeigt, dass das Werkzeug in starker Korrelation zu den anderen Einflussparametern steht. Das Werkzeug ist prozessbedingt nur vor oder nach dem Einsatz auswechselbar, weshalb

nur sehr wenig Einflussmöglichkeiten des Anwenders auf das Werkzeug zur Verfügung stehen.

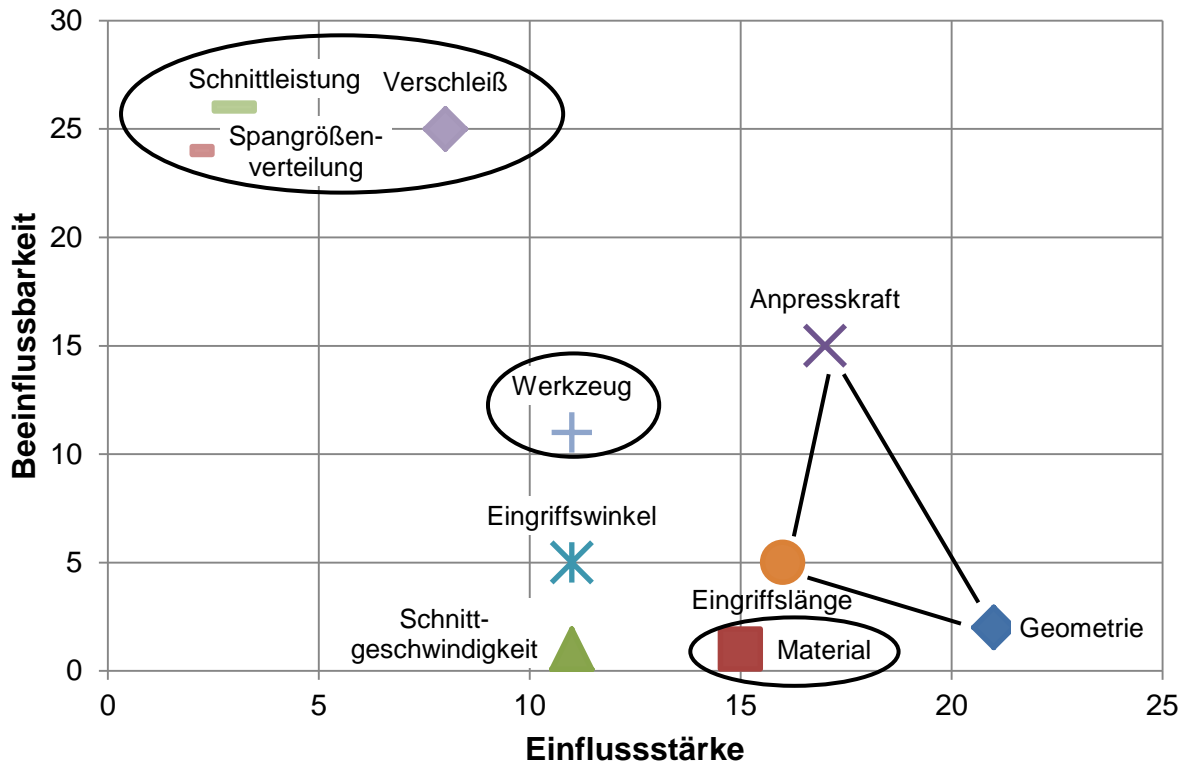


Abbildung 60: Einflussmatrix für das System Seilsäge beim umschlingenden Verfahren

Den gleichen Wert in der Einflussstärke besitzt, wie das Werkzeug, der Eingriffswinkel. Der Eingriffswinkel zeichnet sich mit einer mittleren Einflussstärke und einer niederen Beeinflussbarkeit aus. Der Eingriffswinkel verhält sich ähnlich wie das Werkzeug und kann während des Prozesses vom Anwender nicht oder nur sehr bedingt beeinflusst werden. Dies würde sich mit bewegenden Umlenkrollen vor dem Eintritt in das Werkstück ändern lassen, jedoch sind die Umlenkrollen in den meisten Fällen bei Anwendung des umschlingenden Verfahrens starr und fixiert. Der Eingriffswinkel wird vor dem Beginn des Trennprozesses anhand der montierten Umlenkrollen festgelegt. Während des Trennprozesses ist er variabel, da durch den Prozess Material abgetragen wird und sich somit der Eingriffswinkel stetig ändert. Mit fortschreitendem zeitlichem Verlauf wird er in den meisten Fällen flacher, bis er den Winkel 0° erreicht, der signalisiert, dass das Diamantseil direkt von Umlenkrolle zu Umlenkrolle läuft. Der Eingriffswinkel ist insofern von Bedeutung, da er direkt auf die Anpresskraft wirkt (siehe Abschnitt 2.8.6 Prozessgrößen beim Seilsägen).

Im Diagramm liegt unterhalb des Eingriffswinkels der Parameter Schnittgeschwindigkeit. Die Schnittgeschwindigkeit gibt an, mit was für einer Geschwindigkeit sich das Diamantseil über das Werkstück bewegt. Die Schnittgeschwindigkeit ist von großer Bedeutung, da sie eine Prozessgröße darstellt, die während des Trennprozesses verändert werden kann. Im Vergleich dazu ist die Einflussstärke der Geschwindigkeit wie bei dem Werkzeug und dem Eingriffswinkel von mittlerer Größe. Der Wert der Beeinflussbarkeit ist von allen Parametern der niedrigste. Zu erklären ist dies dadurch, dass nur die Antriebsleistung direkte Auswirkung auf die Geschwindigkeit des Diamantseils hat. Falls die Geschwindigkeit durch beispielsweise erhöhte Reibung aufgrund einer längeren Eingriffslänge abnimmt, wird sie durch die Regelung der Antriebsleistung kompensiert und mehr Leistung wird abgerufen. So

bleibt die Schnittgeschwindigkeit stets, im Rahmen der Leistungsmöglichkeiten, auf dem gleichen Niveau.

Einen geringfügig höheren Wert in der Einflussstärke als die Schnittgeschwindigkeit besitzt der Faktor Material. Das Material ist von zentraler Bedeutung, da es die Prozessgrößen, mit denen getrennt werden soll, festlegt. So muss beispielsweise schon bei der Wahl des Werkzeugs auf die Herstellungsart des Diamantseils geachtet werden, ob es zu dem zu trennenden Material „kompatibel“ ist. In den meisten Fällen ist das zu trennende Material vorgegeben und kann somit als unveränderlich angesehen werden. Je nach Schnittführung können natürlich bei inhomogenen Materialien schwer trennbare Werkstücke umgangen werden, jedoch ist dies in der Praxis wohl eher die Ausnahme. Der Einflussparameter Material besitzt aus diesen Gründen eine niedrige Beeinflussbarkeit. Bei den durchgeführten Versuchsreihen wurden Werkstücke mit homogenem Gefüge aus vergütetem Baustahl und nichtrostende Stahl untersucht.

Die Eingriffslänge befindet sich in ihrer Einflussstärke minimal über dem Punkt für Material. Die Eingriffslänge ist somit ebenfalls von großer Bedeutung. Je größer die Eingriffslänge, desto mehr Antriebsleistung wird benötigt, um die Schnittgeschwindigkeit aufrecht zu erhalten. Jedoch besitzt die Eingriffslänge auch Einfluss auf den erzeugten Vorschub. Beim Trennprozess wird meist der Vorschub konstant über der Trennzeit eingestellt. Da sich jedoch die Eingriffslänge zeitlich über dem Bearbeitungsprozess verändert, erfahren die Diamantsegmente auf dem Werkzeug unterschiedlich viel Anpresskraft. Gerade zu Beginn des Schnitts, wenn beispielsweise das Diamantseil sich mit nur sehr wenigen Diamantsegmenten im Eingriff befindet, erfahren diese eine sehr hohe Anpresskraft, was zu erhöhtem Verschleiß führen kann. Die Eingriffslänge ist deshalb mit einem hohen Wert in der Einflussstärke belegt. Viel wichtiger für die Anwendung in der Praxis ist die Möglichkeit, die Eingriffslänge je nach Schnittführung anzupassen. So kann beispielsweise bei freier Seilanordnung ein quer liegendes Rechteck von oben nach unten mit einer längeren Eingriffslänge oder von links nach rechts mit einer kürzeren Eingriffslänge bei gleicher Fläche getrennt werden. Was für Auswirkungen dies auf die Ausgangsgrößen hat, wird in den nachfolgenden Untersuchungen ersichtlich.

Die Anpresskraft besitzt den zweithöchsten Wert in der Einflussstärke. Die Anpresskraft repräsentiert eigentlich den Vorschub beziehungsweise den Druck, der von dem Werkzeug auf das Werkstück ausgeübt wird. Da die Fläche des Diamantsegmentes, die sich im Eingriff befindet, rechnerisch vereinfacht als Mantelfläche eines halben Zylinders in dieser Arbeit angesehen wird, ist nur die Anzahl der sich im Eingriff befindlichen Diamantsegmente variabel. Diese Anzahl wiederum hängt von der Eingriffslänge ab, weshalb die Anpresskraft isoliert betrachtet wird. Wie aus der Abbildung 60 ersichtlich, ist die Anpresskraft von großer Wichtigkeit für den Trennprozess. Darüber hinaus besitzt die Anpresskraft neben den Ausgangsgrößen wie Verschleiß, Schnittleistung und Spangrößenverteilung den höchsten Wert in der Beeinflussbarkeit, was sie zu einem kritischen Faktor macht. Das bedeutet, dass sich durch die Veränderung der Anpresskraft die anderen Einflussgrößen im System Seilsäge bedeutend ändern können. Die Anpresskraft ist wie die Schnittgeschwindigkeit eine Prozessgröße, die während des Bearbeitungsvorgangs vom Anwender variiert werden kann, was sie ebenfalls zu einer wichtigen Einstellgröße macht.

Den Einflussfaktor mit der größten Einflussstärke besitzt der Geometriefaktor. Die Geometrie ist ein Faktor, der auf den ersten Blick bei einem Trennprozess als vorausgesetzt angesehen wird. Dies stimmt jedoch nur zum Teil, da für den Trennprozess mit einer Seilsäge nur der

Umriss der geometrischen Anordnung von Bedeutung ist. Die zu trennende Geometrie darf nur als Form ihres Umfangs betrachtet werden. Die Lage der Geometrie wird anhand der flexiblen Diamantseilführungen außer Kraft gesetzt. So kann, wie bereits bei dem Faktor der Eingriffslänge beschrieben, beispielsweise bei freier Seilanordnung ein quer liegendes Rechteck der Höhe oder der Länge nach, bei gleicher Fläche, getrennt werden. Die Geometrie des Rechtecks bleibt erhalten, jedoch ändert sich je nach Richtung die Schnittleistung, beziehungsweise der Verschleiß am Werkzeug. In der Praxis mag die Umstellung der Schnitthanordnung mitunter als aufwendig empfunden werden, jedoch sind die Vorteile bei einer optimalen Anordnung hoch, wie in den nachfolgenden Untersuchungen festgestellt wird. Die Beeinflussbarkeit des Faktors Geometrie ist als sehr niedrig eingestuft, weshalb die Geometrie zu der aktivsten Stellgröße zählt.

In der Anordnung des umschlingenden Seilsägeverfahrens ist die zu trennende Geometrie somit das bedeutendste Kriterium gegenüber allen anderen Einflussfaktoren,. Deshalb wurde in dieser Arbeit der Fokus auf verschiedene Geometrien in unterschiedlichen Ausrichtungen gelegt.












3.5 Versuchsreihen

Die in Abschnitt 3.3.2 beschriebenen Verschleißmessungen am Diamantseil sind nicht zeitnah bei gleichzeitiger hoher Genauigkeit anwendbar. Dadurch sind vergleichbare Ergebnisse mehrerer Schnitte mit einem Diamantseil nicht realisierbar, weshalb ein geeignetes Versuchsprogramm aufgestellt werden musste. Ebenfalls musste darauf Rücksicht genommen werden, dass die Diamantseile einen wesentlichen Kostenfaktor darstellen und deshalb optimal genutzt werden sollten.

Es wurde deshalb entschieden, mit einem Diamantseil mehrere Werkstücke zu trennen. So werden pro Diamantseil bis zu elf Probekörper geschnitten. Die Trennzeiten variieren von Werkstück zu Werkstück, was den Verschleißzustand des Diamantseils abbildet. Anhand der unterschiedlich langen Trenndauer pro Werkstück lassen sich Verschleißdiagramme für das Werkzeug ableiten. Da nur ein Parameter über die gesamte Versuchsreihe variiert wird, ist eine Isolierung des gewählten Einflussparameters möglich, was genaue Aussagen über seine resultierende Wirkung zulässt. So kann beispielsweise der Einfluss der Geschwindigkeit auf die Schnittleistung und vor allem auf den anfallenden Werkzeugverschleiß angegeben werden. Dies ermöglicht Analysen über das Schneidverhalten und die Standzeiten der Seile, was wiederum in das Modell überführt werden kann.

Bei der gewählten Versuchsanordnung wurden Diamantseile mit einer Länge von 9,5 m eingesetzt. Die Diamantseile wurden vor dem Bearbeitungseinsatz in sich mit jeweils einer 360° Drehung pro laufendem Meter Diamantseil verdrillt. Bei einer Länge von 9,5 m wurde das Diamantseil für die jeweiligen Versuchsreihen in Summe etwa um 3600° in sich verdrillt, bevor die Enden miteinander verbunden wurden. Ausnahme im Versuchsprogramm war die Versuchsreihe 4, die den Einfluss dieser Verdrillung zeigen sollte. Des Weiteren muss auf das Problem der Seilrisse hingewiesen werden. Die zu Beginn freien Enden des Diamantseils werden nach dem Umschlingen des Werkstücks und der Einfädung in die Seilsäge mit einem Verbinder zusammengefügt.

Tabelle 9: Auflistung des kompletten Versuchsprogramms

Reihenname	Besonderheit	Geometrie	Material	Eingriffswinkel	Vorschub [MPa]	Schnittgeschwindigkeit [m/s]	Verdrillung [1/m]	Schnittfläche pro Versuch [mm ²]
R1	Referenzversuch liegend		vergüteter Baustahl	∅ 26,5°	0,15	20	1	20.000
R2	Referenzversuch rund		vergüteter Baustahl	∅ 23,5°	0,15	20	1	20.106
R3	Referenzversuch hochkant		vergüteter Baustahl	∅ 24,5°	0,15	20	1	20.000
R4	unverdrilltes Diamantseil		vergüteter Baustahl	∅ 24,5°	0,15	20	0	20.000
R5	doppelte Trennfläche		vergüteter Baustahl	∅ 28°	0,15	20	1	40.000
R6	Eingriffswinkel ↑		vergüteter Baustahl	∅ 32°	0,15	20	1	20.000
R7	Eingriffswinkel ↑		vergüteter Baustahl	∅ 28,5°	0,15	20	1	20.106
R8	Eingriffswinkel ↑ Vorschubdruck ↑		vergüteter Baustahl	∅ 32°	0,2	20	1	20.000
R9	Schnittgeschwindigkeit ↓		vergüteter Baustahl	∅ 26,5°	0,15	15	1	20.000
R10	nichtrostender Stahl		nichtrostender Stahl	∅ 26,5°	0,15	20	1	20.000
R11	nichtrostender Stahl		nichtrostender Stahl	∅ 23,5°	0,15	20	1	20.106

Der Verbinder ist die schwächste Stelle im geschlossenen Diamantseil und kann den hohen Kräften während des Bearbeitungsprozesses nicht immer standhalten, was in einem Versagen durch einen Diamantseilriss resultieren kann. Diese Risse treten sporadisch auf, weshalb ein neuer Verbinder angebracht werden muss. Dazu wird der beschädigte Teil des Diamantseils abgeschnitten. Durch diesen abgeschnittenen Teil des Diamantseils verkürzt sich die Standzeit des verbleibenden Diamantseils. Solche Risse sind fast unmöglich zu eliminieren und müssen während der Versuche hingenommen werden. Im Durchschnitt trat ca. alle vier bis fünf Versuche ein Diamantseilriss auf. Da meist nur ca. zwei bis drei Diamantsegmente und somit nur wenige Zentimeter vom Diamantseil abgeschnitten wurden, wurde der Effekt auf die Gesamtlänge von 9,5 m des Diamantseils, als vernachlässigbar angesehen.

Für die Versuchsreihen wurde das umschlingende Verfahren als Anordnung ausgewählt, da dieses in der Praxis vorrangig angewendet wird. Solche Versuchsreihen sind sehr

zeitaufwändig in ihrer Ausführung, insbesondere wenn das Diamantseil des Öfteren von Seilrissen betroffen ist, die wiederum zeitintensiv verschlossen werden müssen. Nach jedem Schnitt muss die Seilsäge wieder vollständig gereinigt werden, da ansonsten die „alten“ Späne mit den neu anfallenden Spänen vermischt werden, was wiederum zu einer Verfälschung der Messergebnisse führen würde. Der Werkstückwechsel ist zeitlich aufwendig und zudem muss während der kompletten Trennzeit die Seilsäge und die Aufnahme der Messwerte überwacht werden.

4 Ergebnisse der Versuchsreihen

Wie in Abschnitt 3.5 bereits beschrieben, werden mehrere Versuchsreihen durchgeführt. Eine Versuchsreihe besteht aus mehreren Versuchen, mit konstant gehaltenen Prozessparametern. Die aus diesen Versuchsreihen ermittelten Ergebnisse werden auf den folgenden Seiten beschrieben. Zur Vereinfachung wird im folgenden Text anstatt Versuchsreihe 1 der Begriff R1 benutzt. Die einzelnen Schnitte sind mit „W“ (für Werkstück) und der Werkstückzahl abgekürzt, beispielsweise wird für den ersten Schnitt „W1“ angegeben.

4.1 Versuchsreihe 1 - quer, liegend

In der ersten Versuchsreihe wurden rechteckige, quer liegende Stahlproben getrennt. Als Schnittgeschwindigkeit v_c wurde ein Wert von 20 m/s gewählt. Die Höhe des Vorschubdrucks, der erzeugt wird um das Werkzeug auf das Werkstück zu pressen, wurde auf 0,15 MPa gesetzt. Das Diamantseil wurde während der Versuchsreihe nicht getauscht, sondern alle Schnitte wurden mit dem gleichen Diamantseil durchgeführt. Durch Analyse der Werte aus verschiedenen Vorversuchen wurde es ermöglicht, zum einen die Prozessparameter realistisch einzustellen und zum anderen die technischen Voraussetzungen der Seilsäge optimal zu nutzen, ohne diese zu überlasten. Gerade bei höheren Seilgeschwindigkeiten hält der Motor diese Geschwindigkeit nur sehr unbeständig.

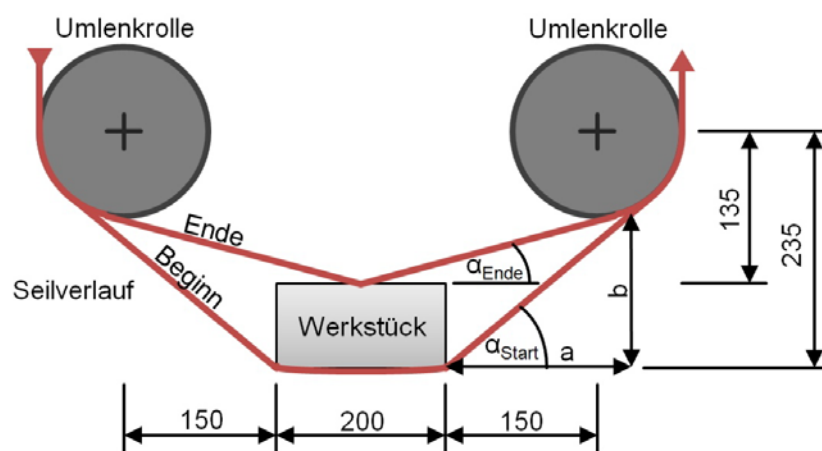


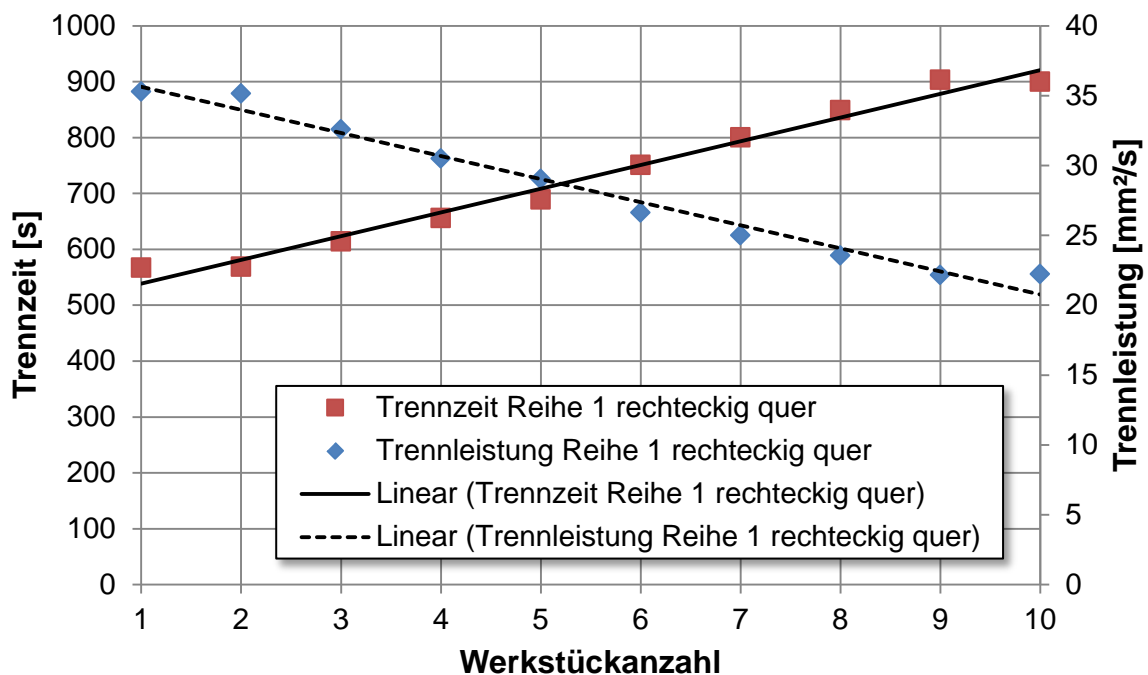
Abbildung 61: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung für R1

Der Eingriffswinkel α ändert sich während des Trennprozesses mit steigendem Fortschritt. So liegt zu Beginn das Diamantseil, bedingt durch die Werkstückgeometrie, vorwiegend an den unteren „Kanten“. Dieser Zustand gibt den Eingriffswinkel α_{Start} an, der bei der Versuchsreihe R1 anfänglich bei 35° liegt und nach folgender einfacher geometrischer Formel unter Berücksichtigung von Abbildung 61 berechnet werden kann:

$$\tan \alpha = \left(\frac{b}{a} \right) \quad (9)$$

Aufgrund der Geometrie befindet sich der letzte Teil des zu trennenden Materials in der Mitte der Oberkante des Werkstücks. Der Winkel kurz vor Ende des Trennschnitts α_{Ende} hat einen Wert von 18° .

Der Schnitt verläuft annähernd symmetrisch, allerdings wird er leicht abgelenkt in Richtung der Austrittsseite des Diamantseils. Erklärt werden kann dies dadurch, dass der Motor über seine Antriebsrolle den Diamantseilabschnitt zwischen Werkstück und Antriebsrolle direkt mit Zug belastet somit unter Spannung setzt. Deshalb ist die Anpresskraft auf der Diamantseilaustrittsseite des Werkstücks leicht erhöht. Es sind Analogien zu einem Riemengetriebe vorhanden, bei dem je nach Belastung vom ziehenden Trum (Lasttrum) oder vom gezogenen Trum (Leertrum) gesprochen wird.



Material:	Vergüteter Baustahl
	$R_{p0,2} = 540 \text{ MPa}$
Geometrie:	Rechteck, quer liegend
Schnittfläche pro Werkstück:	20.000 mm^2
Schnittgeschwindigkeit:	20 m/s
Vorschubdruck:	$0,15 \text{ MPa}$
Werkzeug:	$9,5 \text{ m}$; galvanisch belegt
Verdrillung:	1 x pro laufendem m Seillänge

Abbildung 62: Trennzeit/-leistungen der Versuchsreihe R1

Abbildung 62 zeigt die Trennzeit/-leistungen, die benötigt wurden, um die jeweiligen Werkstücke zu trennen. Da die getrennte Fläche jeweils konstant ist verhält sich die Trennleistung umgekehrt proportional zur Trennzeit, weshalb in den folgenden Versuchsreihen nur noch die Trennzeit dargestellt wird. Die Trennzeiten für W1 und W2 weichen nur geringfügig voneinander ab, da gerade zu Beginn das mit Gummi überzogene Diamantseil sich erst von der Gummischicht befreien muss. Dies führt zu einer höheren Trennzeit. Als erstes Ergebnis zeigt sich, wie viel Zeit für die Ablösung der Gummibeschichtung wirklich benötigt wird. Die Steigerung der Trennzeit in den

nachfolgenden Versuchen liegt im Durchschnitt bei ca. 5 %, was ungefähr 45 Sekunden entspricht. Wird diese mittlere Steigerung von den nachfolgenden Versuchen auf den ersten Versuch interpoliert, so ergibt sich eine theoretische Trennzeit von 524 Sekunden. Die Differenz zwischen gemessener (567 Sek.) und interpolierter theoretischer Trennzeit (524 Sek.) für den ersten Versuch beläuft sich auf 43 Sekunden. Somit kann von einer Steigerung der Trennzeit bei dieser Versuchsanordnung, bedingt durch den zusätzlichen Gummiabrieb, um ca. 7,5 % gegenüber der theoretischen Trennzeit ausgegangen werden.

Die Trennzeit hat sich ausgehend von dem interpolierten theoretischen Wert am Start für W1 bis zum Ende W10 um insgesamt 72 % erhöht. Somit beträgt die tatsächliche mittlere Trennzeiterhöhung zwischen den einzelnen Versuchen 6,5 %. Zu Beginn lag die Schnittleistung, wieder für die theoretische Trennzeit ohne Gummiüberzug, bei 38,17 mm²/s. Wegen dem Gummiüberzug sollte der erste Wert immer interpoliert werden, da aber die Auswirkungen des Gummiüberzugs nicht exakt ermittelt werden können, wurde es in der Arbeit nicht näher betrachtet. Für den letzten Versuch W10 lag diese Schnittleistung nur noch bei 22,2 mm²/s. Für eine Fläche von 200.000 mm² benötigte die Seilsäge insgesamt 8.155 Sekunden. Somit ergibt sich eine Gesamtschnittleistung von 26,97 mm²/s.

Entgegen der Erwartung flacht die Kurve für den letzten Wert ab. Anzunehmen wäre eigentlich, dass sich die Trennzeit durch den Verschleiß am Werkzeug verstärkt erhöht, jedoch ist das Gegenteil der Fall und die Trennzeiterhöhung stagniert. Der komplette Versuchsaufbau wurde daraufhin auf Störstellen untersucht, jedoch wurden keine Unregelmäßigkeiten festgestellt. Möglicherweise kam es zu minimalen Abweichungen in den Einstellparametern aufgrund des Bedieners.

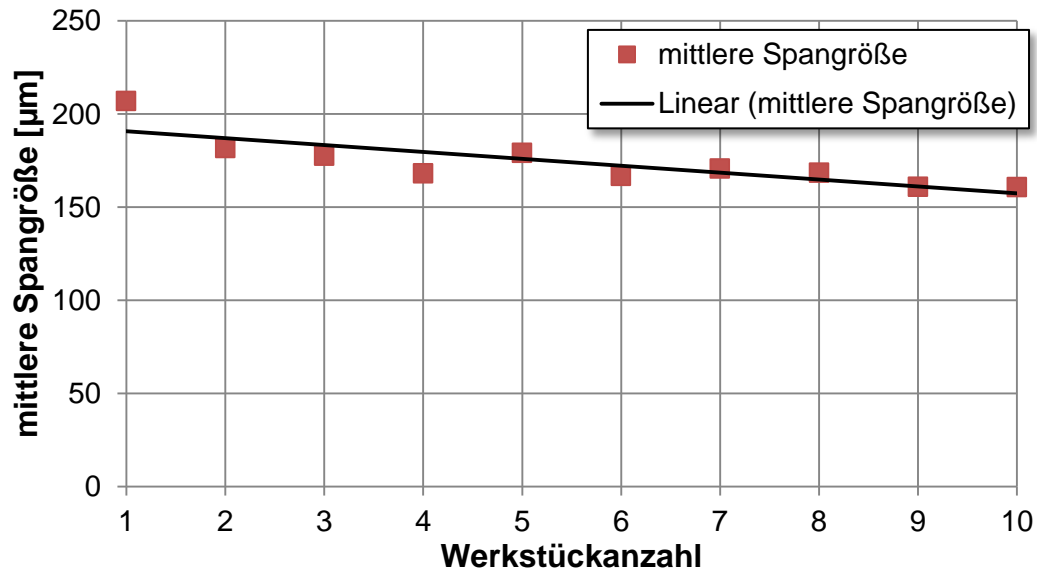


Abbildung 63: Mittlere Spangröße für die Versuche der Reihe R1

Nach jedem Schnitt wurden die angefallenen Späne der einzelnen Versuche in der Reihe klassifiziert. Die Tendenz zu abnehmender Spangröße mit steigender Versuchsanzahl ist gegeben, so dass davon ausgegangen werden kann, dass der fortschreitende Verschleiß am Werkzeug auch kleinere Späne hervorbringt. Die mittlere Spangröße nimmt im Durchschnitt über alle Versuche, im linearen Trend um jeweils 1,69 % ab. Der geringere Abtrag durch das Diamantseil hat zur Folge, dass natürlich auch die Trennzeit erhöht wird. Die durchschnittliche mittlere Spangröße in der Gesamtheit aller Versuche liegt bei 173,8 µm. Die Spangrößenverteilung für jeden einzelnen Versuch ist in Anhang A zu finden.

4.2 Versuchsreihe 2 - rund

In der zweiten Versuchsreihe wurden die gleichen Rahmenbedingungen wie bei Versuchsreihe R1 verwendet, allerdings wurden anstatt rechteckigen, quer liegenden Werkstücken runde Werkstücke getrennt. Die runden Werkstücke haben, wie in Abschnitt 3.1.5 beschrieben, mit einem Durchmesser von 160 mm einen annähernd gleichen Flächeninhalt wie die rechteckigen Werkstücke. Die Schnittgeschwindigkeit v_c wurde mit einem Wert von 20 m/s beibehalten. Die Höhe des Vorschubdrucks wurde ebenfalls bei 0,15 MPa belassen. Für die Versuchsreihe kam ein neues Seil zum Einsatz. Das Diamantseil wurde wiederum während der Versuchsreihe nicht getauscht, sondern alle Schnitte wurden mit dem gleichen Diamantseil durchgeführt.

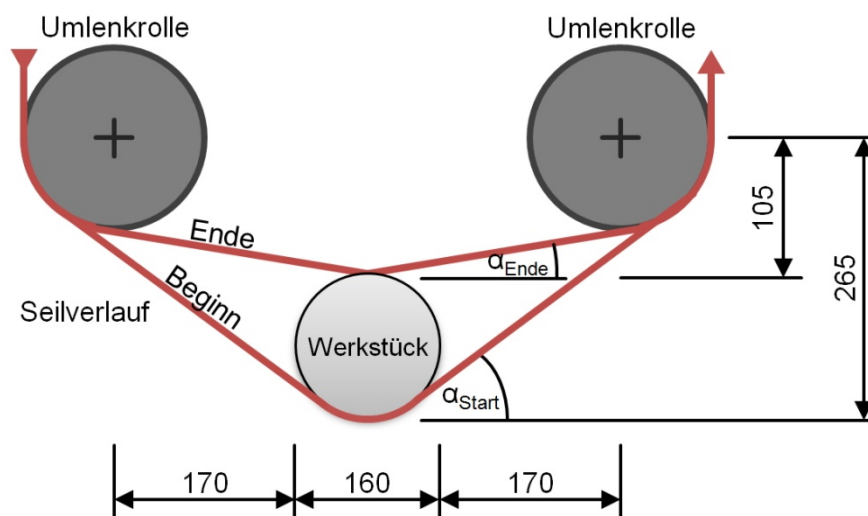
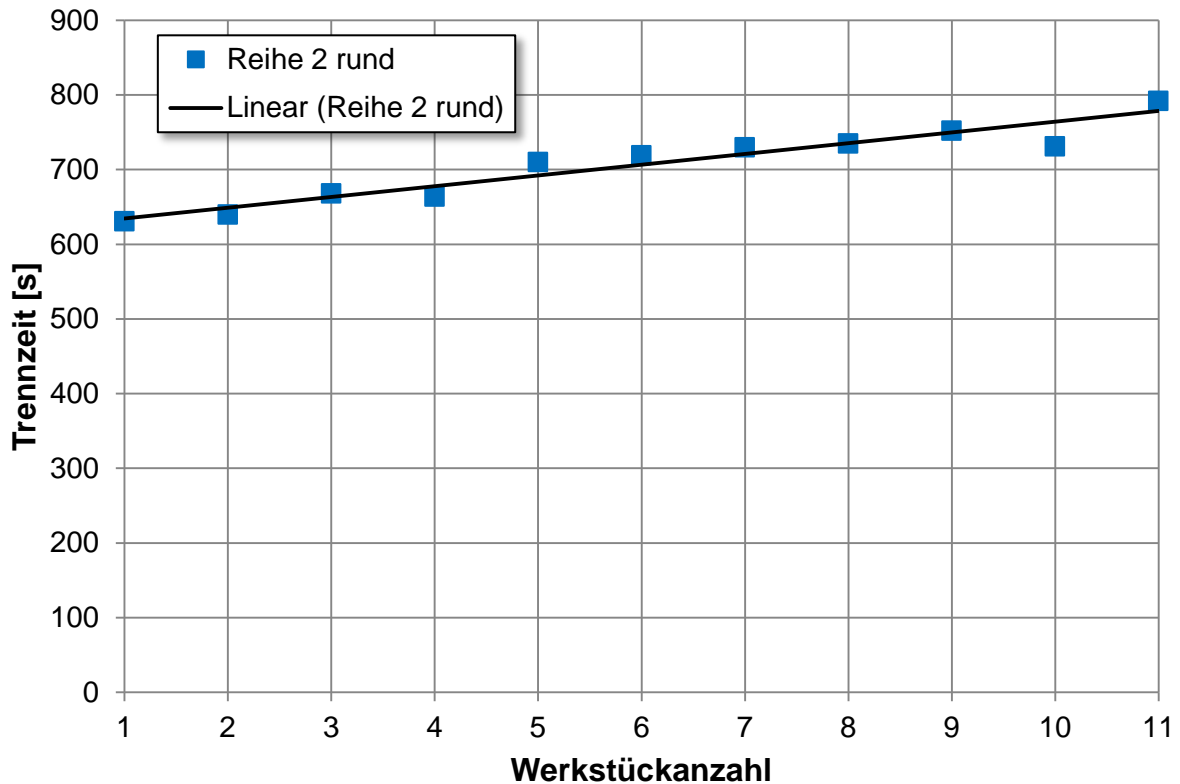


Abbildung 64: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung für R2

Der Eingriffswinkel α ändert sich aufgrund der neuen Werkstückgeometrie ebenfalls. So liegt der Eingriffswinkel α_{Start} bei der Versuchsreihe R2 anfänglich bei 33° . Aufgrund der Geometrie befindet sich auch, wie bei den rechteckigen, quer liegenden Werkstücken, das letzte zu trennende Material in der Mitte der Oberkante des Werkstücks. Der Eingriffswinkel kurz vor Ende des Trennschnitts α_{Ende} hat einen Wert von 14° .

Der große Vorteil zu Beginn des Schnitts wird im Vergleich zwischen rechteckigen, quer liegenden und runden Werkstücken schnell ersichtlich. Bei den runden Werkstücken liegt das Diamantseil perfekt in einem runden Bogen an. Somit muss das Diamantseil nicht zuerst selbst diese sich im Schnittverlauf einstellende Form heraustrennen, sondern kann sie schon von Beginn des Schnittprozesses an nutzen. Bei rechteckigen Proben müssen zuerst die Kanten bearbeitet werden, erst danach stellt sich eine stetig verlaufende Eingriffslänge ein. Daraus ergibt sich ein weiterer Unterschied zu den rechteckigen, quer liegenden Werkstücken. Bei den runden Werkstücken ist, das Diamantseil von Anfang an in einer Länge im Eingriff und nicht wie bei den rechteckigen, quer liegenden Werkstücken, bedingt durch die Kanten auf beiden Seiten, geteilt.

Da jeweils pro Werkstück zwei Schnitte durchgeführt wurden, mussten für die Versuchsreihe R2 mit elf Versuchen insgesamt fünf Werkstücke verwendet werden.



Material:	Vergüteter Baustahl
	$R_{p0,2} = 540 \text{ MPa}$
Geometrie:	rund
Schnittfläche pro Werkstück:	20.106 mm^2
Schnittgeschwindigkeit:	20 m/s
Vorschubdruck:	0,15 MPa
Werkzeug:	9,5 m; galvanisch belegt
Verdrillung:	1 x pro laufendem m Seillänge

Abbildung 65: Trennzeiten der Versuchsreihe R2

Für die Versuchsreihe wurde ein weiteres neuwertiges Diamantseil verwendet, das sich ebenfalls zuerst von der Gummibeschichtung freischneiden musste. Im Gegensatz zu der Versuchsreihe R1 besitzt dieser Umstand nur wenig Einfluss auf die Trennzeiten. Die durchschnittliche Trennzeiterhöhung zwischen den Versuchen lag bei ca. 2,3 %, was ungefähr 13 Sekunden entspricht. Wird diese mittlere Steigung von den nachfolgenden Versuchen auf den ersten Versuch wieder interpoliert, so ergibt sich eine theoretische Trennzeiten von 627 Sekunden. Die Differenz zwischen gemessener (631 Sek.) und interpolierter Trennzeiten (627 Sek.) für den ersten Versuch beläuft sich folglich auf 4 Sekunden. Somit kann von einer Steigerung der Trennzeiten bei dieser Versuchsanordnung, bedingt durch den zusätzlichen Gummiabrieb, um ca. 0,6 % gegenüber dem theoretischen Wert für W1 ausgegangen werden.

Die tatsächliche durchschnittliche Trennzeiterhöhung zwischen den Versuchen lag bei ca. 2,3 %. Die Trennzeiten hat sich im Verlauf von W1 bis zum Ende von W11 um insgesamt 25,5 % erhöht. Zu Beginn lag die Schnittleistung bei $31,86 \text{ mm}^2/\text{s}$. Beim letzten Versuch W11 war die Schnittleistung niedriger; sie lag bei nur noch $25,39 \text{ mm}^2/\text{s}$. Für eine Fläche von

220.000 mm² benötigte die Seilsäge insgesamt 7.772 Sekunden. Somit ergibt sich eine Gesamtschnittleistung von 28,46 mm²/s.

Kleinere Ausreißer wie beispielsweise W4 oder W10 sind existent, fallen jedoch kaum ins Gewicht.

Wie schon in Versuchsreihe R1 wurden wieder die angefallenen Späne der einzelnen Versuche klassifiziert. Auffallend ist, dass beim ersten Versuch im Vergleich zu den anderen Versuchen nur eine geringe mittlere Spangröße erzeugt wurde. Wie in dieser Versuchsreihe gut zu beobachten ist, unterliegen die Werte einer gewissen Messunsicherheit. Aufgrund der nur moderaten bis geringen mittleren Trennzeiterhöhung, die als Indikator für den angefallenen Verschleiß dient, kann geschlossen werden, dass es sich hierbei um Abweichungen handelt. Ebenfalls dafür verantwortlich können Fehlerquellen sein, wie beispielsweise eine zu geringe Spanentnahme oder ein fehlerhaftes Wiegen der Späne. Aufgrund der sich schnell einstellenden Oxidation der Späne sind nachträglich durchgeführte Klassifizierungen nur bedingt aussagekräftig.

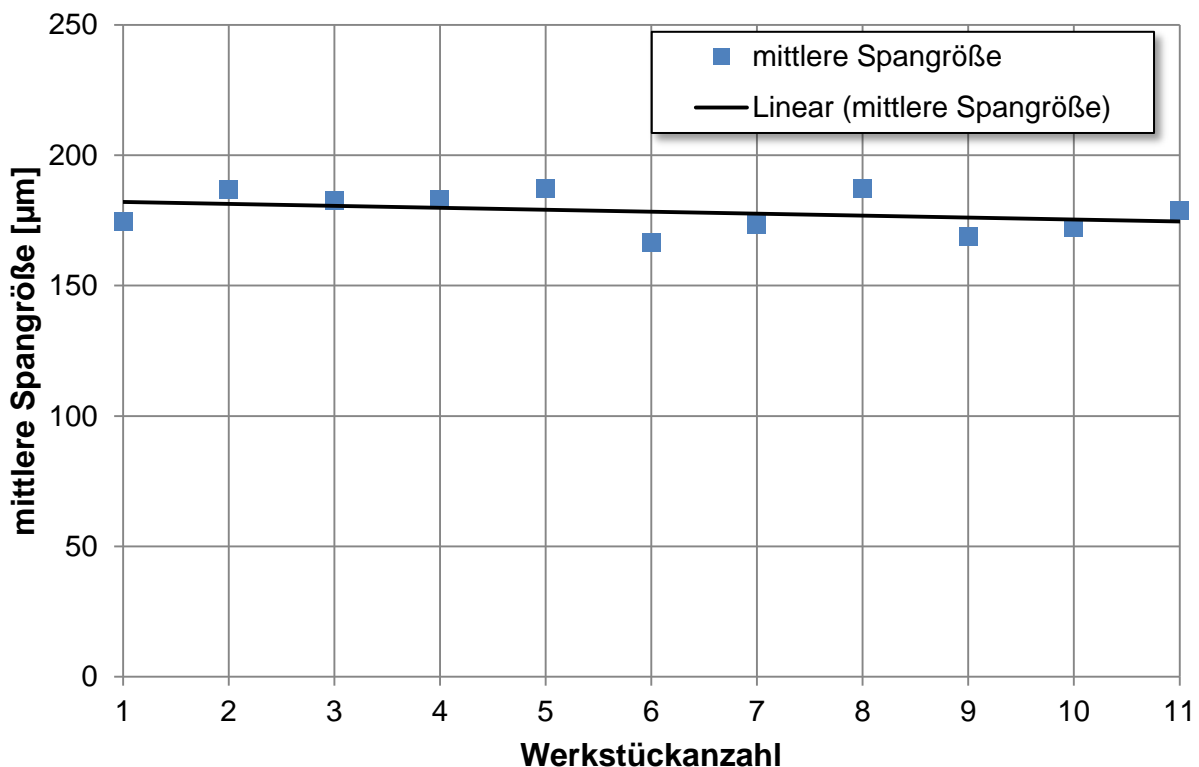


Abbildung 66: Mittlere Spangröße für die Versuche der Reihe R2

Die Tendenz der mittleren Spangröße mit fortlaufend steigender Versuchsanzahl ist in ihrer Spangröße abnehmend, auch wenn die Abweichungen zwischen den Versuchen recht hoch ausfallen. Die geringe Abnahme der mittleren Spangröße verhält sich umgekehrt proportional zu der leicht zunehmenden Trennzeit.

Die mittlere Spangröße nimmt im Durchschnitt über alle Versuche im linearen Trend um jeweils 0,42 % ab. Die durchschnittliche mittlere Spangröße in der Gesamtheit aller Versuche liegt bei 178,4 µm und fällt damit nur unwesentlich höher aus als bei der Versuchsreihe 1 mit einem Wert von 173,8 µm.

4.3 Versuchsreihe 3 - hochkant, stehend

In der dritten Versuchsreihe wurden die gleichen Rahmenbedingungen wie schon bei Versuchsreihe R1 und R2 verwendet, allerdings wurde die Geometrie ein weiteres Mal modifiziert, so dass statt eines rechteckigen, quer liegenden Werkstücks ein rechteckiges, hochkant stehendes Werkstück verwendet wurde. Das Werkstück aus der Versuchsreihe R1 wurde somit um 90° gedreht. An den eigentlichen Abmessungen erfolgte keine Änderung. Die Schnittgeschwindigkeit v_c wurde beibehalten und auf 20 m/s eingestellt. Der Vorschubdruck wurde ebenfalls bei 0,15 MPa belassen. Für die Versuchsreihe kam ein neues Seil zum Einsatz. Das Diamantseil wurde wiederum während der Versuchsreihe nicht getauscht, sondern alle Schnitte wurden mit dem gleichen Diamantseil durchgeführt.

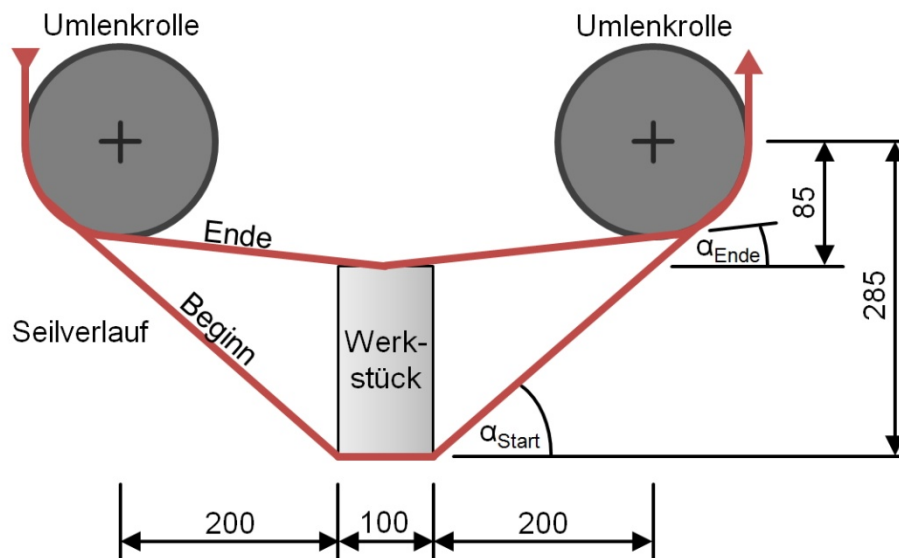
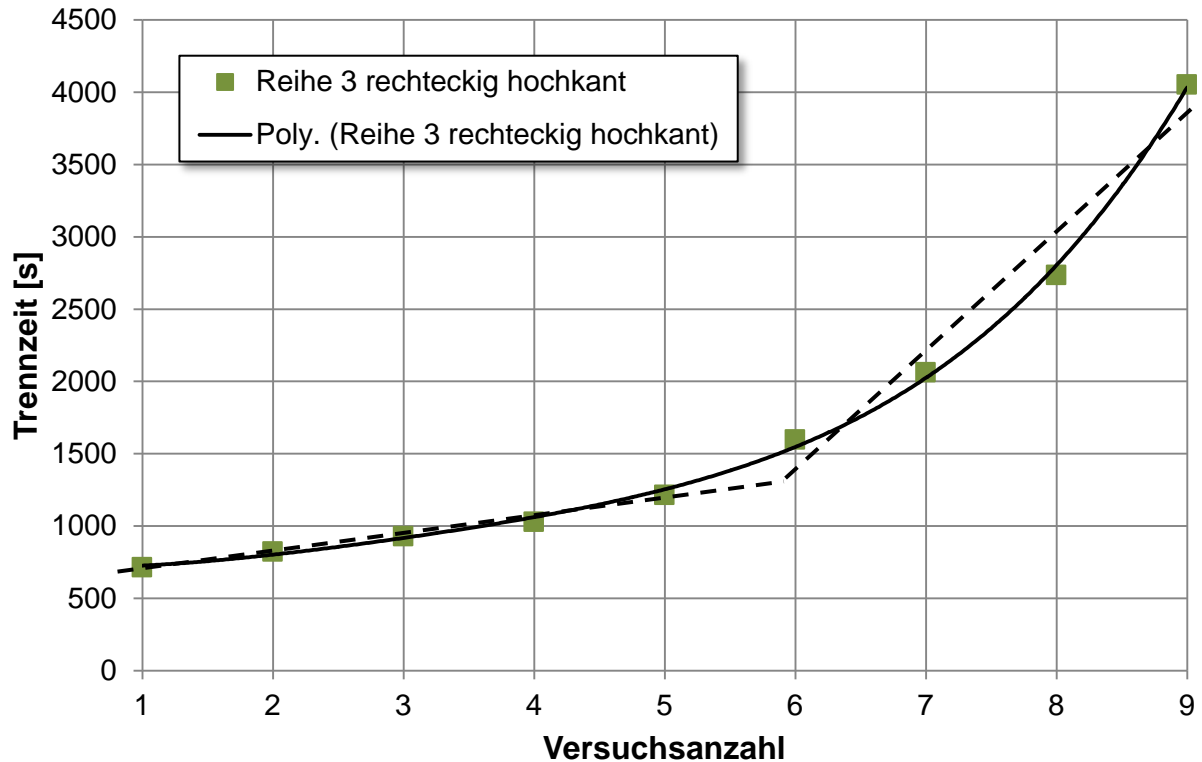


Abbildung 67: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung für R3

Aufgrund der neuen Anordnung der Werkstückgeometrie ändert sich der Eingriffswinkel α erneut. So liegt der Eingriffswinkel α_{Start} bei der Versuchsreihe R3 anfänglich bei 43° . Aufgrund der Geometrie befindet sich auch hier das letzte zu trennende Material annähernd in der Mitte der Oberkante des Werkstücks. Der Eingriffswinkel kurz vor Ende des Trennschnitts α_{Ende} hat einen Wert von 6° . Die Anordnung des Werkstücks musste bereits vor der Durchführung der Reihen R1 und R2 so gestaltet sein, dass alle Werkstückgeometrien im gleichen Schwerpunkt fixiert werden konnten. Wäre dies nicht der Fall, wäre eine Vergleichbarkeit nur unzureichend möglich, beziehungsweise wäre, falls der höchste Werkstückpunkt oberhalb der tiefsten tangentialen möglichen Linie zwischen den beiden Umlenkrollen läge, ein Schnitt nicht vollständig durchführbar.

Da jeweils pro Werkstück zwei Schnitte durchgeführt wurden, mussten für die Versuchsreihe R3 mit neun Versuchen insgesamt fünf Werkstücke verwendet werden.

Abbildung 68 zeigt die Versuchsreihe R3 für rechteckige, hochkant stehende Werkstücke. Wie bei Versuchsreihe R2 ist hier ebenfalls keine signifikante Trennzeiterhöhung aufgrund des erstmaligen Gebrauchs des Diamantseils und dem damit verbundenen Freischneiden des Gummibelags für den ersten Versuch zu beobachten.



Material:	Vergüteter Baustahl
	$R_{p0,2} = 540 \text{ MPa}$
Geometrie:	Rechteck, hochkant stehend
Schnittfläche pro Werkstück:	20.000 mm ²
Schnittgeschwindigkeit:	20 m/s
Vorschubdruck:	0,15 MPa
Werkzeug:	9,5 m; galvanisch belegt
Verdrillung:	1 x pro laufendem m Seillänge

Abbildung 68: Trennzeiten der Versuchsreihe R3

Die Trennzeit hat sich im Verlauf von W1 bis zum Ende von W9 von 715 Sekunden auf 4.055 Sekunden erhöht, was einem Anstieg von 467 % entspricht. Zu Beginn der Versuchsreihe lag die Schnittleistung für W1 bei 27,98 mm²/s. Für den letzten Versuch W9 lag diese Schnittleistung mit einem Wert von 4,95 mm²/s wesentlich niedriger. Für eine Fläche von 180.000 mm² benötigte die Seilsäge insgesamt 15.170 Sekunden. Somit ergibt sich eine Gesamtschnittleistung von 11,90 mm²/s.

Klar erkennbar ist der exponentielle Anstieg in der Trennzeit. Nach sechs Versuchen lag die Trennzeit schon doppelt so hoch und nach neun Versuchen wurde bereits das fast sechsfache an Zeit benötigt um das Werkstück zu trennen. Das Diamantseil war zu diesem Zeitpunkt schon sehr stark verschlissen, was auch optisch leicht erkennbar war, so dass die Versuchsreihe nach nur neun Versuchen beendet wurde. Einen weiteren Versuch hätte über das Ende der Standzeit für das Diamantseil hinausgereicht, so dass keine verwertbare Trennzeit mehr entstanden wäre.

Da die anderen Versuchsreihen nicht bis zum Standzeitende des Diamantseils gelaufen sind wurden diese um die Werte in einer Formel möglichst genau wiederzugeben nur linear

interpoliert. Da in dieser Versuchsreihe jedoch das Standzeitende des Diamantseils erreicht worden ist, wurde um eine bessere Vergleichbarkeit zu erhalten, zusätzlich die exponentielle Trendlinie anhand von zwei linearen Trendlinien angenähert. Die Trendlinie für die ersten fünf Versuche deckt sich nahezu mit den Werten der exponentiellen Trendlinie. Da die Differenz zwischen W5 und W6 gegenüber den anderen Versuchen zuvor stark zunimmt, wurde an dieser Stelle mit einer neuen linearen Trendlinie begonnen.

Wie in den vorherigen Versuchsreihen wurden die angefallenen Späne der einzelnen Versuche klassifiziert. Markant beim ersten Versuch ist, im Vergleich zu den anderen Versuchen der Reihe, dass eine grobe Spangröße mit $196,88 \mu\text{m}$ erzeugt wurde. Diese vergrößert die durchschnittliche mittlere Spangröße. Im weiteren Verlauf sind durchaus geringere mittlere Spangrößen erzeugt worden.

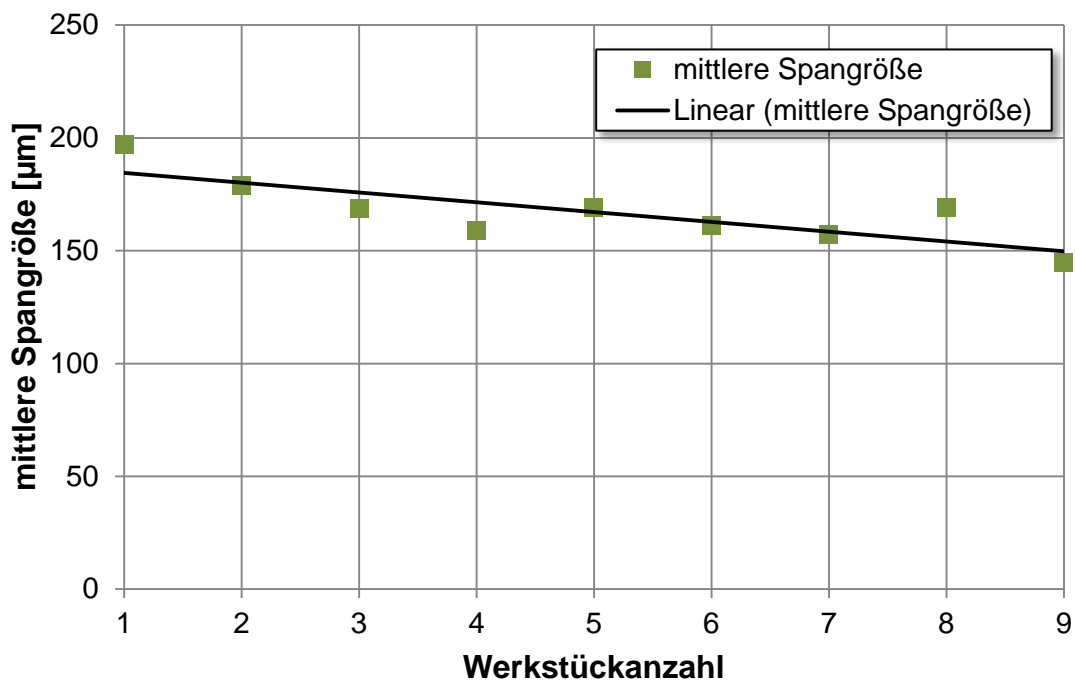


Abbildung 69: Mittlere Spangröße für die Versuche der Reihe R3

Der Wert der Spangröße für die fortlaufenden Versuche sinkt stetig, mit Ausnahme der beiden Versuche W5 und W8. Die Tendenz über alle Versuche ist wie bereits schon bei den anderen Versuchsreihen abnehmend, jedoch in diesem Falle besonders stark ausgeprägt. Auch zeigt sich, dass der Anstieg der Trennzeit sich annähernd umgekehrt proportional zum Abfall der mittleren Spangröße verhält.

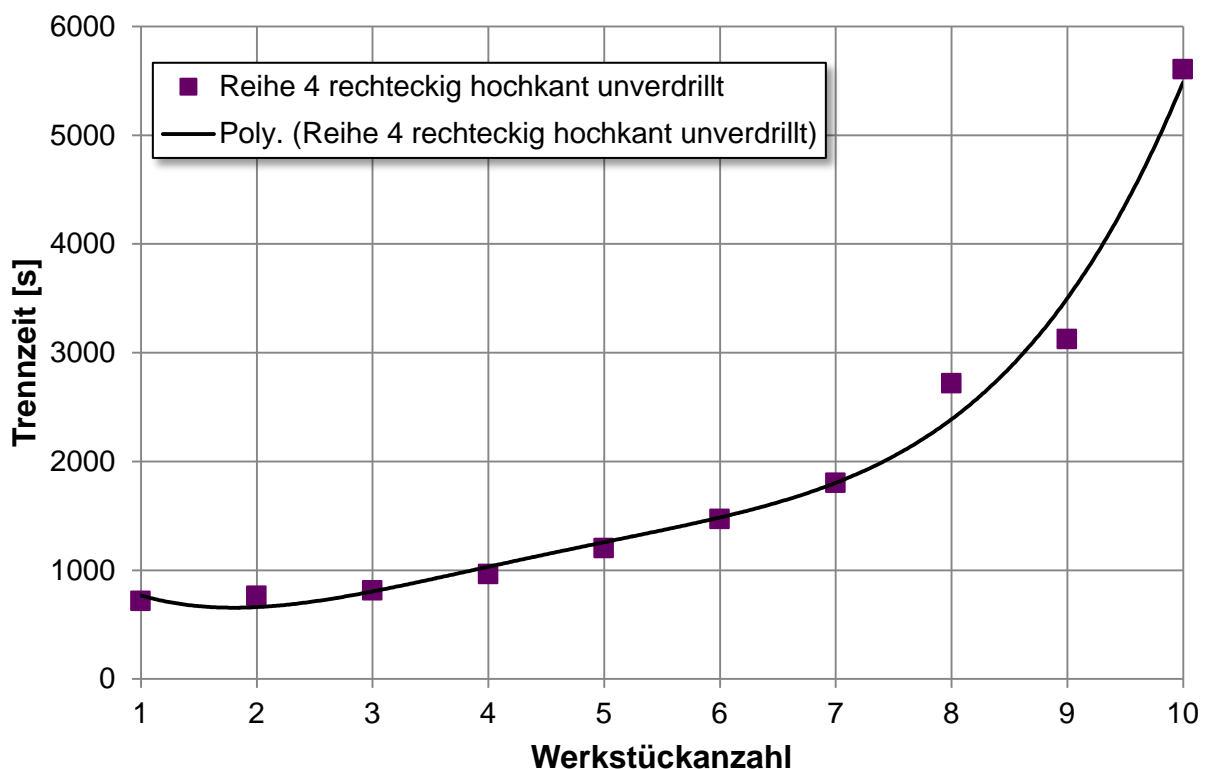
Einen ebenfalls sehr interessanten Wert in der Reihe stellt der zuletzt durchgeführte Versuch W9 dar. Die mittlere Spangröße liegt bei $144,7 \mu\text{m}$. Da bei diesem Versuch die Standzeit des Diamantseils weitestgehend erreicht war, kann dieser Wert, unter Berufung auf die bereits gemessenen Trends, nur schwer unterschritten werden. Dieser Umstand wird nachfolgend im Kapitel der Diskussion näher betrachtet.

Die mittlere Spangröße nimmt im Durchschnitt über alle Versuche im linearen Trend um jeweils $2,57\%$ ab. Die durchschnittliche mittlere Spangröße in der Gesamtheit aller Versuche liegt bei $167,1 \mu\text{m}$ und fällt damit kleiner aus als bei der Versuchsreihe R1 mit $173,8 \mu\text{m}$ oder der Versuchsreihe R2 mit $178,4 \mu\text{m}$.

4.4 Versuchsreihe 4 - hochkant, unverdrillt

Für die Versuchsreihe R4 wurden die gleiche Anordnung und die gleichen Parametereinstellungen wie bei der Versuchsreihe R3 verwendet, jedoch wurde das Diamantseil nicht verdrillt, sondern kam unverdrillt zum Einsatz. Üblicherweise werden die Diamantseile vor dem Bearbeitungsprozess in sich, um jeweils 360° pro laufenden Meter Diamantseil, verdrillt. In der Praxis findet diese Art von Verdrillung Anwendung um einen einseitigen Verschleiß am Diamantsegment zu verhindern, damit der komplette Umfang des Diamantsegmentes in Eingriff mit dem Werkstück kommen kann. Die Versuchsreihe R4 soll den Einfluss der Verdrillung zeigen. Nach Abschnitt 3.3.1 wird die Verdrillung der Einflussgröße des Werkzeugs zugeordnet.

Die Anordnung ist identisch zur Versuchsreihe R3 und kann Abbildung 67 entnommen werden. Da jeweils pro Werkstück zwei Schnitte durchgeführt werden, mussten für die Versuchsreihe R4 mit zehn Versuchen insgesamt fünf Werkstücke verwendet werden.



Material:	Vergüteter Baustahl $R_{p0,2} = 540 \text{ MPa}$
Geometrie:	Rechteck, hochkant stehend
Schnittfläche pro Werkstück:	20.000 mm ²
Schnittgeschwindigkeit:	20 m/s
Vorschubdruck:	0,15 MPa
Werkzeug:	9,5 m; galvanisch belegt
Verdrillung:	0 x pro laufendem m Seillänge → unverdrillt

Abbildung 70: Trennzeiten der Versuchsreihe R4

Abbildung 70 zeigt die Ergebnisse der Versuchsreihe R4 für rechteckige, hochkant stehende Werkstücke mit unverdrilltem Diamantseil. Wie schon in Versuchsreihe R3 ist ebenfalls keine signifikante Trennzeiterhöhung aufgrund des erstmaligen Gebrauchs des Diamantseils und dem damit verbundenen Freischneiden des Gummibelags für den ersten Versuch zu beobachten.

Die Erhöhung der Trennzeit zwischen den Versuchen lag im Durchschnitt bei ca. 27 %. Die Trennzeit hat sich im Verlauf von W1 bis zum Ende von W10 von 719 Sekunden auf 5.607 Sekunden erhöht, was einem Anstieg von 680 % entspricht. Zu Beginn der Versuchsreihe lag die Schnittleistung für W1 bei 27,81 mm²/s und für den letzten Versuch W10 lag die Schnittleistung nur noch bei einem Wert von 3,56 mm²/s. Die Gesamtschnittleistung der Reihe mit einer Gesamtfläche von 200.000 mm² und einer Gesamttrenndauer von 19.194 Sekunden lag bei 10,42 mm²/s.

Erkennbar ist der wie bereits in Reihe R3 beobachtete exponentielle Anstieg in der Trennzeit. Nach sechs Versuchen betrug die Trennzeit schon das Doppelte, nach zehn Versuchen wurde bereits das Achtfache an Zeit benötigt um das Werkstück zu trennen. Die Standzeit des Diamantseils war ebenfalls erreicht.

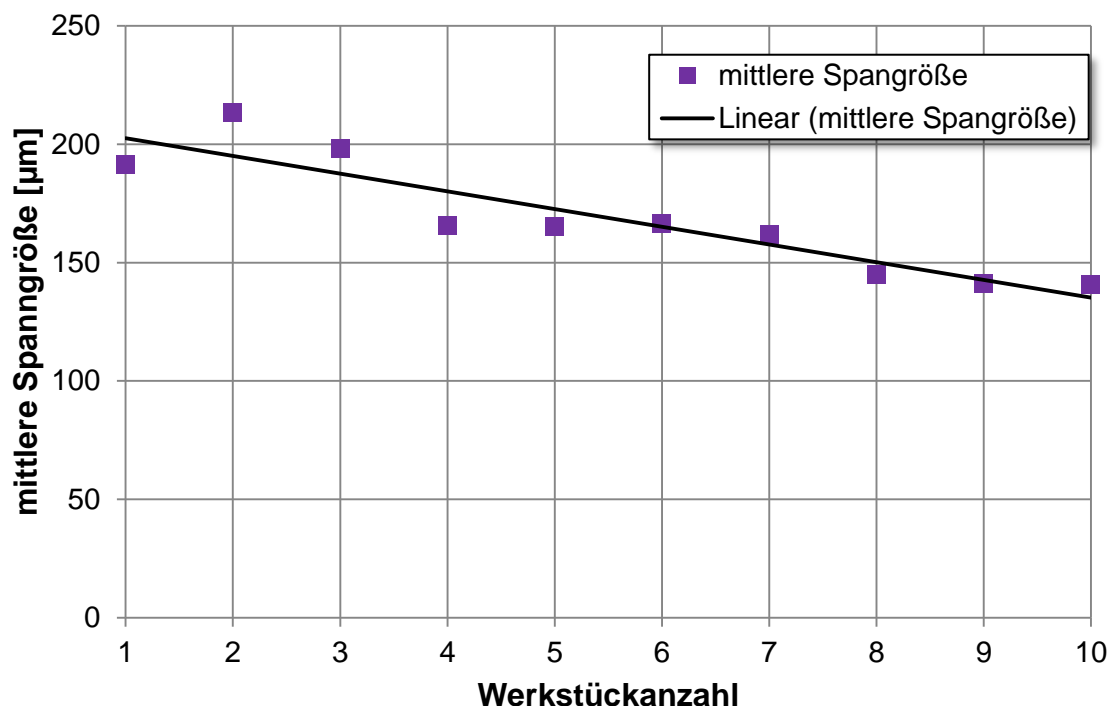


Abbildung 71: Mittlere Spangröße für die Versuche der Reihe R4

Wie in den vorherigen Versuchsreihen wurden die angefallenen Späne dieser Versuchsreihe klassifiziert. Auffallend ist, dass bei den ersten drei Versuchen, im Vergleich zu den anderen Versuchen, sehr grobe mittlere Spangrößen erzeugt wurden. Die mittlere Spangröße nimmt im Durchschnitt über alle Versuche im linearen Trend um jeweils 4,4 % ab. Die durchschnittliche mittlere Spangröße in der Gesamtheit aller Versuche liegt bei 168,9 µm und fällt damit auch sehr ähnlich wie bei Reihe R3 mit 167,1 µm aus. Gleichmaßen kann auch hier der Wert <150 µm als Abbruchkriterium für den Tausch des Diamantseils genommen werden. Zum ersten Mal wird dieser Wert bei W8 unterschritten, der schon eine dreifache Trennzeit zum Ausgangswert von W1 aufweist.

4.5 Versuchsreihe 5 - doppelt, hochkant

In Versuchsreihe R5 wurden, ähnlich wie in der dritten und vierten Reihe, rechteckige, hochkant stehende Werkstücke getrennt. Allerdings wurden bei dieser Versuchsreihe zwei Werkstücke pro Schnitt, also die doppelte Fläche, getrennt. Die Werkstücke sind nebeneinander an der Wechsellvorrichtung befestigt worden, so dass sich ein weiteres Mal die Versuchsanordnung geändert hat. Die neue Anordnung ist Abbildung 72 zu entnehmen. Die Schnittgeschwindigkeit v_c wurde auf 20 m/s beibehalten und der Vorschubdruck wurde wieder auf 0,15 MPa eingestellt. Für die Versuchsreihe kam ein neues Seil zum Einsatz. Das Diamantseil wurde während der Versuchsreihe nicht getauscht, sondern alle Schnitte wurden mit dem gleichen Diamantseil durchgeführt. Bei der Versuchsreihe wurde die Seilverdrillung von 360° pro laufenden Meter Diamantseil wieder aufgenommen.

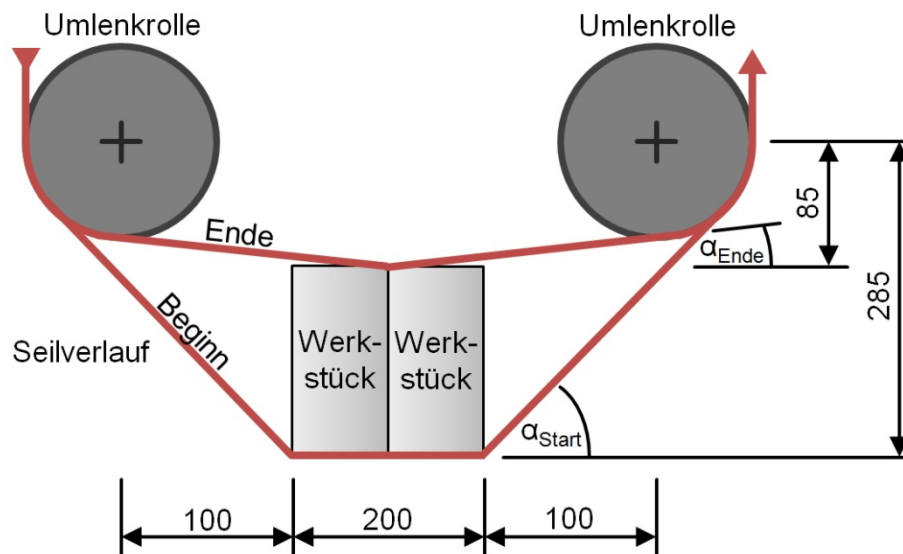
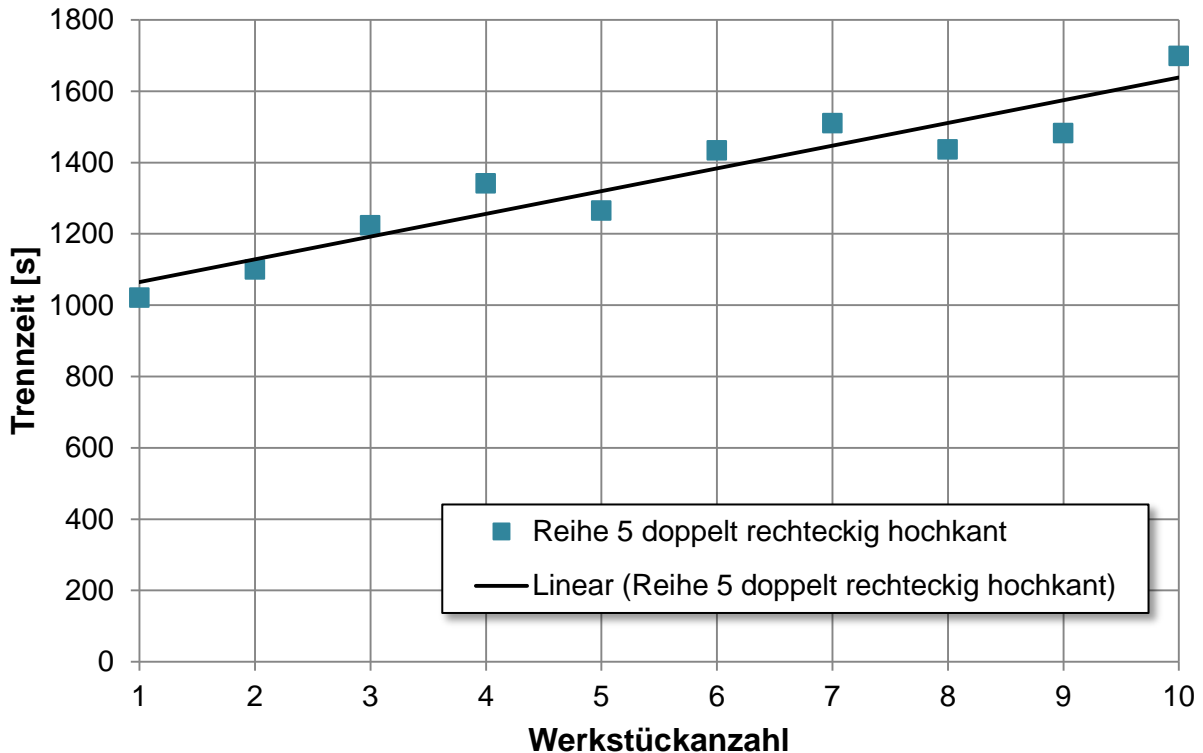


Abbildung 72: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung für R5

Aufgrund der neuen Anordnung der Werkstückgeometrie ändert sich der Eingriffswinkel α erneut. So liegt der Eingriffswinkel α_{Start} bei der Versuchsreihe R5 zu Beginn des Trennprozesses bei 50° . Aufgrund der Geometrie befindet sich auch hier das letzte zu trennende Material annähernd in der Mitte der Oberkante des Werkstücks. Der Eingriffswinkel kurz vor Ende des Schnitts α_{Ende} hat einen Wert von 6° . Da jeweils pro Werkstück zwei Schnitte durchgeführt wurden, mussten für die Versuchsreihe R5 mit zehn Versuchen, die doppelte Anzahl wie bisher üblich, insgesamt zehn Werkstücke verwendet werden.

Abbildung 73 zeigt die Trennzeiten für die Versuchsreihe R5 mit zwei rechteckigen, hochkant stehenden Werkstücken. Wie in den vorherigen Versuchsreihen ist hier ebenfalls keine signifikante Trennzeiterhöhung aufgrund des erstmaligen Gebrauchs des Diamantseils und dem damit verbundenen Freischneiden des Gummibelags für den ersten Versuch zu beobachten.



Material:	Vergüteter Baustahl $R_{p0,2} = 540 \text{ MPa}$
Geometrie:	2 x Rechteck, hochkant stehend
Schnittfläche pro Werkstück:	20.000 mm ²
Schnittgeschwindigkeit:	20 m/s
Vorschubdruck:	0,15 MPa
Werkzeug:	9,5 m; galvanisch belegt
Verdrillung:	1 x pro laufendem m Seillänge

Abbildung 73: Trennzeiten der Versuchsreihe R5

Die durchschnittliche Trennzeiterhöhung zwischen den Versuchen lag bei ca. 6,1 % was ungefähr einer Trennzeiterhöhung von 62 Sekunden entspricht. Die Trennzeit hat sich im Verlauf von W1 bis zum Ende von W10 von 1021 Sekunden auf 1699 Sekunden erhöht, was einem Anstieg von 66 % entspricht. Zu Beginn der Versuchsreihe lag die Schnittleistung für W1 bei 39,1 mm²/s. Dies ist die größte Schnittleistung gegenüber den vorherigen Versuchsreihen. Für den letzten Versuch W10 lag diese Schnittleistung bei einem Wert von 23,5 mm²/s. Für eine Fläche von 400.000 mm² benötigte die Seilsäge insgesamt 13.515 Sekunden. Somit ergibt sich eine Gesamtschnittleistung von 29,6 mm²/s.

Erkennbar ist der nahezu lineare Anstieg in der Trennzeit. Je mehr das Diamantseil verschleißt, desto größer wird auch der Anstieg in der Trennzeit. Aus der Reihe fallen die Versuche W4 und W8, da hier die Trennzeit von dem jeweils vorherigen Versuch unterschritten wurde. Aufgrund dieser Tatsache ist anzunehmen, dass die Trennzeiten einer gewissen Schwankung unterliegen. Bei der größten Differenz (W4 zu W5) beträgt der Unterschied ca. 5 %.

Interessant ist die höhere Schnittleistung, die einfach durch eine Verdoppelung der Schnittfläche und durch eine Änderung der Geometrie von quer liegenden, rechteckigen Werkstücken aus Versuchsreihe R1 zu quadratischen Werkstücken aus Versuchsreihe R5 erzielt wurde. Die beiden Versuchsreihen können am ehesten miteinander verglichen werden, da sie eine ähnliche Eingriffslänge besitzen. So ändert sich die Gesamtschnittleistung von 26,97 mm²/s aus Reihe R1 zu 29,6 mm²/s in Reihe R5. Also nahezu eine ähnliche Schnittleistung.

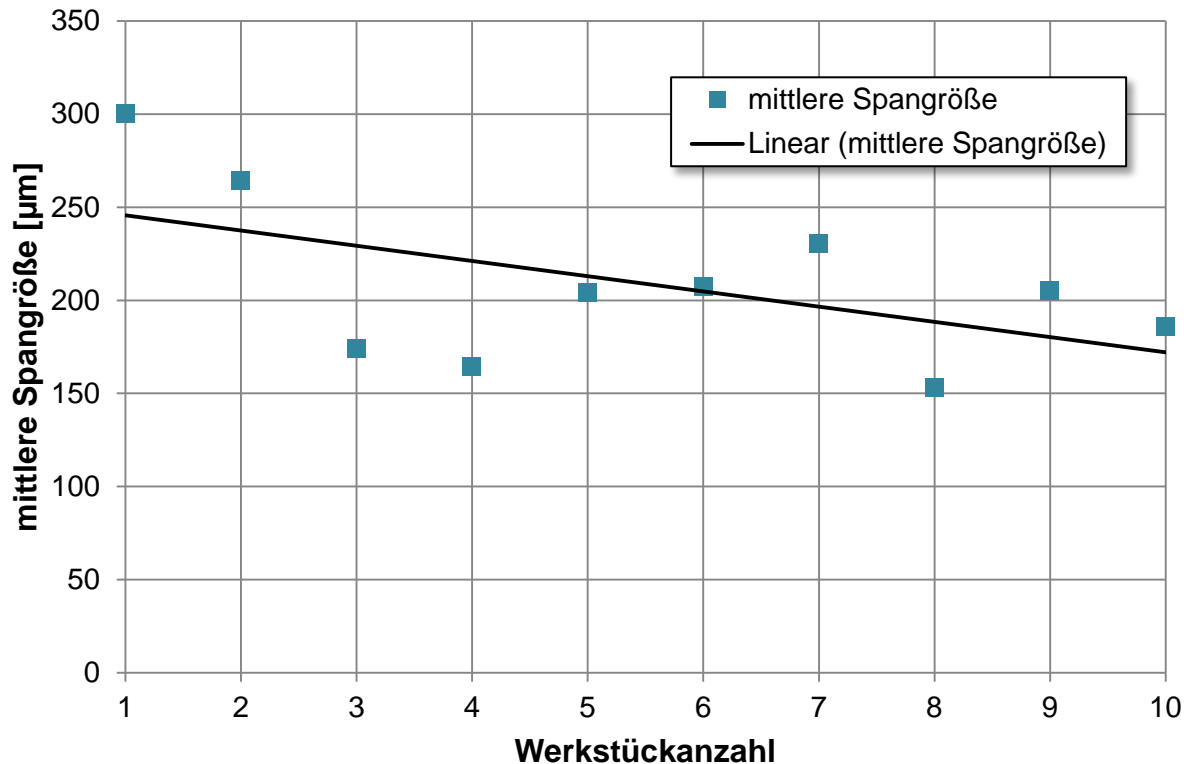


Abbildung 74: Mittlere Spangröße für die Versuche der Reihe R5

Auch bei dieser Versuchsreihe wurden die angefallenen Späne klassifiziert, wie in Abbildung 74 zu erkennen ist. Auffallend sind die großen Sprünge zwischen den Versuchen, wie sie auch bei den Trennzeiten zu beobachten waren. Im ersten Versuch wurde, gegenüber den anderen Versuchen, die bis dahin größte mittlere Spangröße registriert. Trotz allem nimmt der lineare Trend der mittleren Spangröße im Durchschnitt über alle Versuche um jeweils 3,9 % ab. Die durchschnittliche mittlere Spangröße in der Gesamtheit aller Versuche beträgt 208,9 µm und fällt damit im Vergleich zu den anderen Versuchsreihen sehr groß aus.

Interessant ist der Versuch W8 der Reihe, da hier die Trennzeit im Vergleich zu dem vorherigen Versuch W7 fällt, was auch bei der mittleren Spangröße Auswirkungen zeigt. So fällt die mittlere Spangröße von 230,56 µm (W7) auf 153,34 µm (W8) ab. Des Weiteren ist zu beobachten, dass die mittlere Spangröße in der Gesamtheit aller Versuche relativ hohe Werte annimmt, was bis zum jetzigen Stand der Erkenntnisse und unter Berücksichtigung der hohen Leistungswerte auf einen effektiven Trennprozess hinweist.

4.6 Versuchsreihe 6 - quer, alternativer Eingriffswinkel

In der Versuchsreihe R6 wurde der Einflussparameter des Eingriffswinkels näher untersucht. So kam eine ähnliche Anordnung wie bei der Versuchsreihe R1 zur Anwendung, jedoch wurde das Werkstück um 5 cm weiter nach unten gesetzt, so dass sich die Eingriffswinkel änderten. Es wurden wie in Versuchsreihe R1 rechteckige, quer liegende Stahlproben getrennt. Als Schnittgeschwindigkeit v_c wurde wieder ein Wert von 20 m/s gewählt und der Vorschubdruck wurde auf 0,15 MPa eingestellt. Für die Versuchsreihe kam ein neues Seil zum Einsatz. Das Diamantseil wurde während der Versuchsreihe nicht getauscht, sondern alle Schnitte wurden mit dem gleichen Diamantseil durchgeführt.

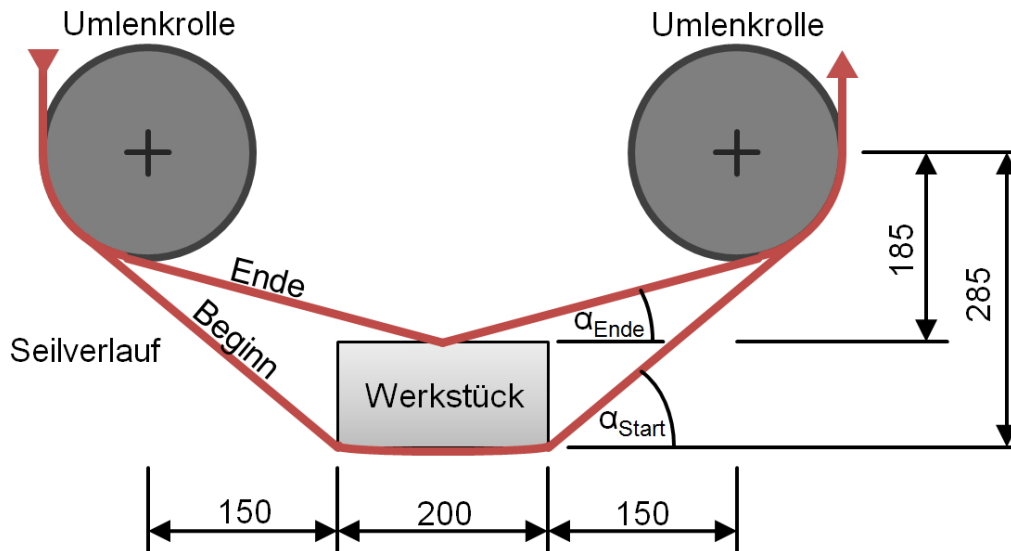


Abbildung 75: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung für R6

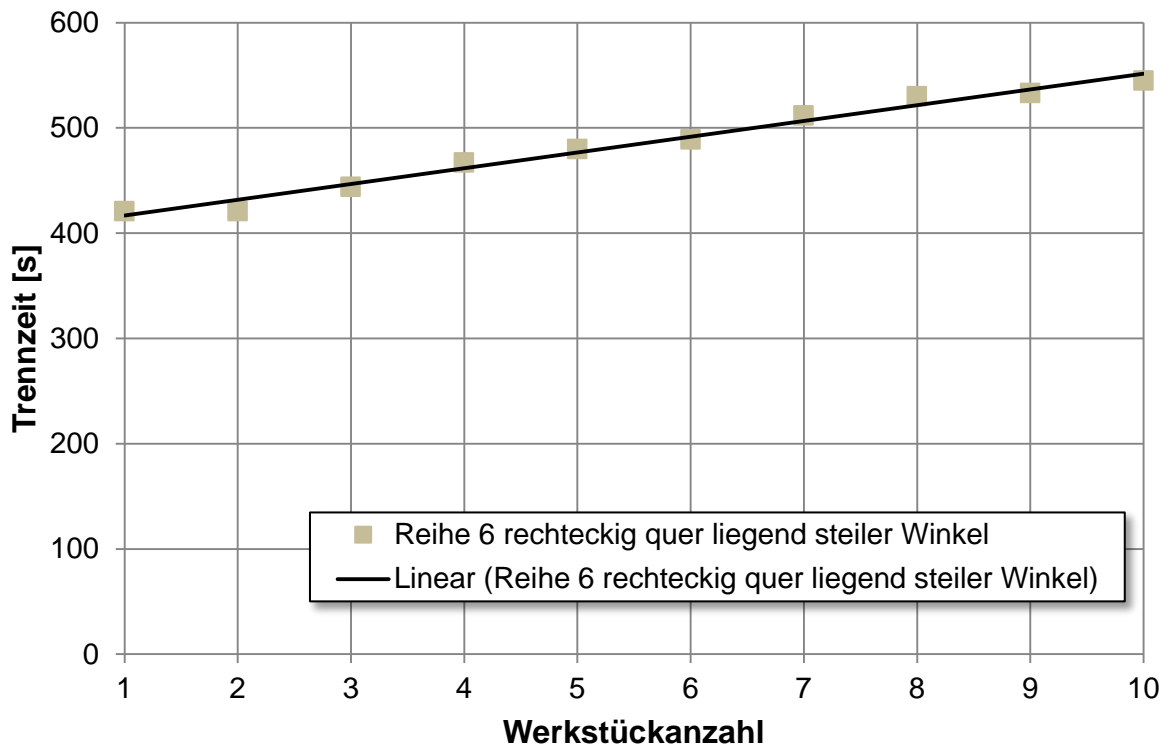
Wie bereits zuvor beschrieben, ändert sich der Eingriffswinkel α während des Trennprozesses mit steigendem Fortschritt. So liegt zu Beginn das Diamantseil, bedingt durch die Werkstückgeometrie, vorwiegend an den unteren Kanten an. Dieser Zustand gibt den Eingriffswinkel α_{Start} an, der bei der Versuchsreihe R1 anfänglich bei 35° lag. Durch die Herabsetzung des Werkstücks um 5 cm ändert sich folglich dieser Eingriffswinkel α_{Start} und vergrößert sich dadurch auf 40° . Der Eingriffswinkel hatte kurz vor Ende des Trennschnitts α_{Ende} bei der Versuchsreihe R1 einen Wert von 18° . Bei der Versuchsreihe R6 liegt dieser Wert bei 24° . Es ergibt sich also ein Unterschied von 5° zu Beginn und 6° gegen Ende des Schnittes. Dies wird in der nachfolgenden Abbildung 76 dargestellt.

Da jeweils pro Werkstück zwei Schnitte durchgeführt wurden, mussten für die Versuchsreihe R6 mit zehn Versuchen insgesamt fünf Werkstücke verwendet werden.

Abbildung 76 zeigt die Trennzeiten der Versuchsreihe R6 für rechteckige, quer liegende Werkstücke, die um 5 cm tiefer positioniert wurden als in Versuchsreihe R1. Wie bereits in Versuchsreihe R1 ist auch hier wieder für den ersten Versuch eine Trennzeiterhöhung aufgrund des erstmaligen Gebrauchs des Diamantseils und dem damit verbundenen Freischneiden des Gummibelags für den ersten Versuch zu beobachten.

Die Trennzeiten für W1 und W2 weichen nicht voneinander ab, da sich zu Beginn dieser Versuchsreihe das mit Gummi überzogene Diamantseil erst von der Gummischicht befreien muss. Die Steigung der Trennzeit in den nachfolgenden Versuchen liegt im Durchschnitt bei

ca. 3 %. Wird diese mittlere Steigerung von den nachfolgenden Versuchen auf den ersten Versuch interpoliert, so ergibt sich eine Trennzeit von 404 Sekunden. Die Differenz zwischen gemessener (421 Sek.) und interpolierter Trennzeit (404 Sek.) für den ersten Versuch beläuft sich folglich auf 17 Sekunden. Somit kann von einer Steigerung der Trennzeit bei dieser Versuchsanordnung, bedingt durch den zusätzlichen Gummiabrieb, um ca. 3,5 % ausgegangen werden.



Material:	Vergüteter Baustahl
	$R_{p0,2} = 540 \text{ MPa}$
Geometrie:	Rechteck, quer liegend
Schnittfläche pro Werkstück:	20.000 mm ²
Schnittgeschwindigkeit:	20 m/s
Vorschubdruck:	0,15 MPa
Werkzeug:	9,5 m; galvanisch belegt
Verdrillung:	1 x pro laufendem m Seillänge

Abbildung 76: Trennzeiten der Versuchsreihe R6

Die Trennzeit hat sich von W1 bis zum Ende der Versuchsreihe zu W10, ausgehend von dem interpolierten Wert, um 29 % erhöht. Somit beträgt die theoretische mittlere Trennzeiterhöhung zwischen den einzelnen Versuchen 2,9 %. Zu Beginn lag die Schnittleistung, wieder für die theoretische Trennzeit ohne Gummiüberzug, bei 49,50 mm²/s, was die bis dato höchste Schnittleistung aller Versuchsreihen darstellt. Für den letzten Versuch W10 lag diese Schnittleistung bei 36,69 mm²/s. Für eine Fläche von 200.000 mm² benötigte die Seilsäge insgesamt 4.842 Sekunden. Somit ergibt sich eine Gesamtschnittleistung von 41,3 mm²/s.

Gegenüber der Versuchsreihe R1 ist der Anstieg der Schnittleistung auffallend. Einzig veränderter Parameter war der Eingriffswinkel. Er wurde um 5° zu Beginn und um 6° gegen

Ende des Schnitts vergrößert, was eine Erhöhung der Gesamtschnittleistung von 26,97 mm²/s auf 41,3 mm²/s bewirkte. Diese verhältnismäßig geringfügige Änderung des Eingriffswinkels erhöhte also die Gesamtschnittleistung um ca. 53 %.

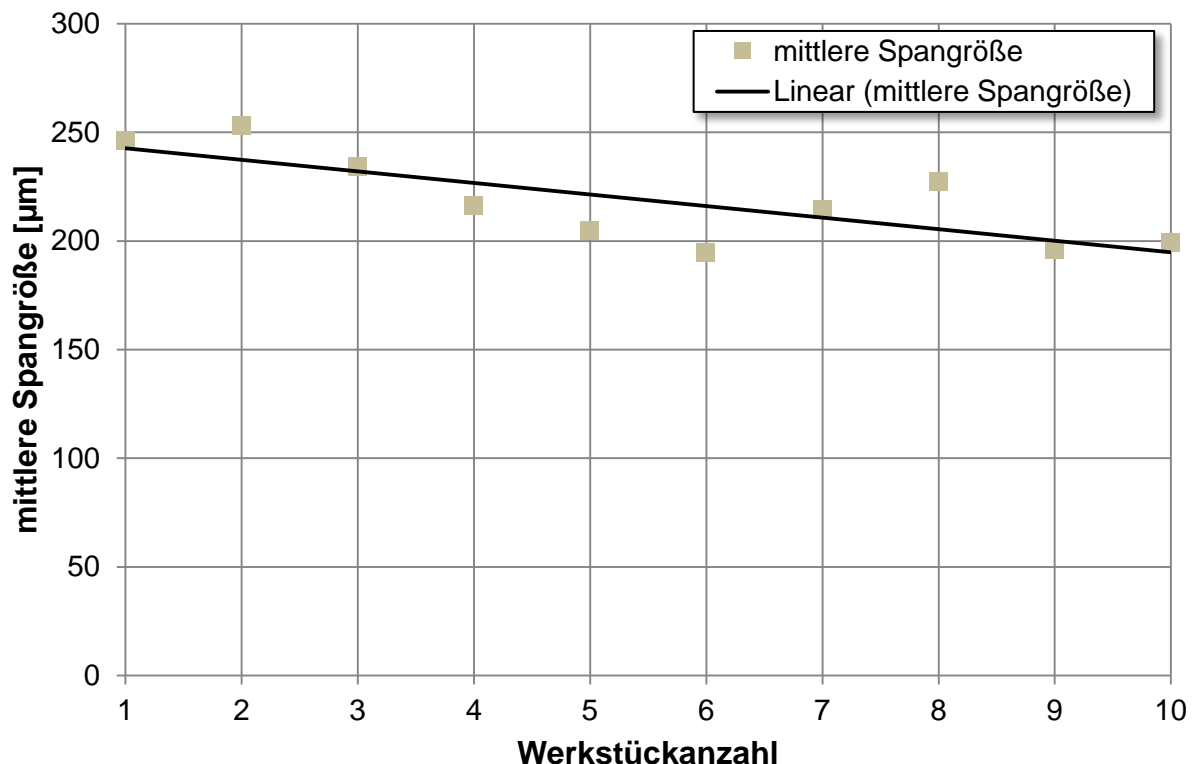


Abbildung 77: Mittlere Spangröße für die Versuche der Reihe R6

Des Weiteren wurden die angefallenen Späne der einzelnen Versuche in der Reihe klassifiziert, wie Abbildung 77 zu entnehmen ist. Im zweiten Versuch wurde im Vergleich zu den anderen Versuchsreihen die bis dato größte mittlere Spangröße mit 253,27 µm gemessen. Der lineare Trend der mittleren Spangröße nimmt im Durchschnitt über alle Versuche um jeweils 2,41 % ab. Die durchschnittliche mittlere Spangröße in der Gesamtheit aller Versuche liegt bei 218,7 µm und fällt damit gegenüber den anderen Versuchsreihen höher aus.

Auffallend sind die Versuche W7 und W8 der Reihe, da bei beiden die mittlere Spangröße wieder stark anstieg. Weiterhin ist zu beobachten, dass die mittlere Spangröße in der Gesamtheit aller Versuche gegenüber den anderen Versuchsreihen sehr hohe Werte annimmt, was ebenfalls bis zum jetzigen Stand der Erkenntnisse und unter Berücksichtigung der hohen Leistungswerte auf einen effektiven Trennprozess hinweist. Je größer die Spangröße, desto effektiver scheint der Trennprozess zu verlaufen. Im Vergleich zur Versuchsreihe R1, deren mittlere Spangröße über alle Versuche bei 173,8 µm lag, grenzt sich die Versuchsreihe R6 mit 218,7 µm deutlich ab.

Es muss jedoch noch einmal darauf hingewiesen werden, dass das Werkstück lediglich um 5 cm tiefer positioniert wurde und dies, wie sich anhand der Daten zeigt, signifikante Auswirkungen auf den Trennprozess hat. Der Faktor des Eingriffswinkels ist deshalb, im Hinblick auf die Trennleistung, von großer Bedeutung.

4.7 Versuchsreihe 7 - rund, alternativer Eingriffswinkel

In der Versuchsreihe R7 wurden wie in Versuchsreihe R6 die Werkstücke um 5 cm nach unten versetzt, um den Eingriffswinkel zu vergrößern; jedoch wurden statt quer liegenden Werkstücken runde Werkstücke getrennt. Die Versuchsanordnung kann Abbildung 78 entnommen werden. Als Geometrie kamen runde Werkstücke, die aus dem Material Stahl bestehen, zum Einsatz. Der Vorschubdruck blieb unverändert auf 0,15 MPa eingestellt und die Schnittgeschwindigkeit von 20 m/s wurde ebenfalls beibehalten. Für die Versuchsreihe kam ein neues Seil zum Einsatz. Das Diamantseil wurde während der Versuchsreihe nicht getauscht, sondern alle Schnitte wurden mit dem gleichen Diamantseil durchgeführt.

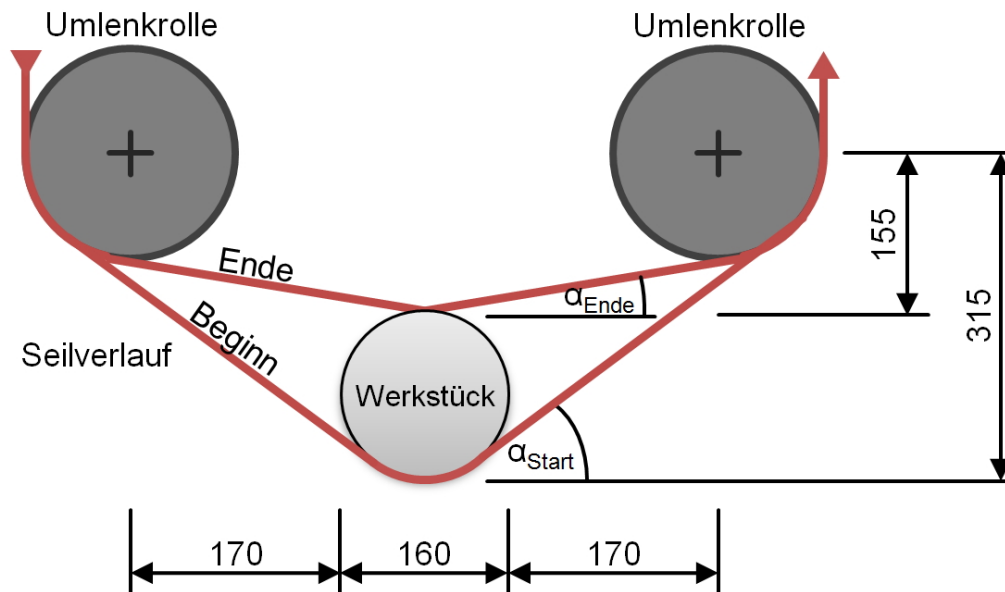


Abbildung 78: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung für R7

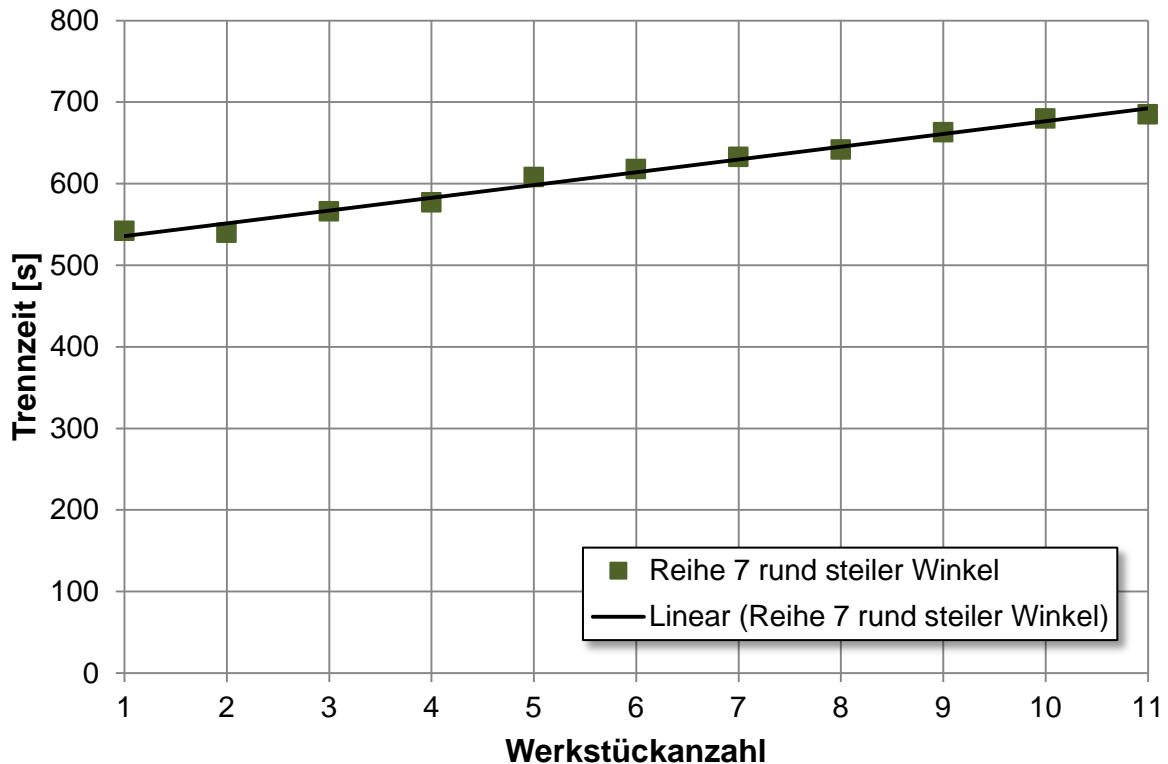
Aufgrund der neuen Anordnung der Werkstückgeometrie ändert sich der Eingriffswinkel α erneut. So liegt der Eingriffswinkel α_{Start} bei der Versuchsreihe R7 zu Beginn des Trennprozesses bei 37° , während er bei der vergleichbaren Versuchsreihe R2 33° betrug. Aufgrund der Geometrie befindet sich auch hier das letzte zu trennende Material annähernd in der Mitte der Oberkante des Werkstücks. Der Eingriffswinkel kurz vor Ende des Schnitts α_{Ende} hat einen Wert von 20° , im Gegensatz zur Versuchsreihe R2 mit 14° . Die mittlere Differenz zwischen den Anfangs- und Endeingriffswinkeln von Reihe R7 zu R2 beträgt $5,5^\circ$.

Da jeweils pro Werkstück zwei Schnitte durchgeführt wurden, mussten für die Versuchsreihe R7 mit elf Versuchen insgesamt sechs Werkstücke verwendet werden.

Abbildung 79 zeigt die Trennzeiten der Versuchsreihe R7 für runde Werkstücke, die um 5 cm tiefer positioniert wurden als in Versuchsreihe R2. Wie bereits in Versuchsreihe R2 ist auch hier wieder für den ersten Versuch eine Trennzeiterhöhung aufgrund des erstmaligen Gebrauchs des Diamantseils und dem damit verbundenen Freischneiden des Gummibelags für den ersten Versuch zu beobachten.

Die durchschnittliche Trennzeiterhöhung zwischen den Versuchen lag bei ca. 2,57 %, was ungefähr 14 Sekunden entspricht. Wird diese mittlere Steigerung von den nachfolgenden Versuchen auf den ersten Versuch wieder interpoliert, so ergibt sich eine theoretische Trennzeit von 530 Sekunden. Somit kann von einer Steigerung der Trennzeit bei dieser

Versuchsanordnung, bedingt durch den zusätzlichen Gummiabrieb, um ca. 2,3 % ausgegangen werden.



Material:	Vergüteter Baustahl
	$R_{p0,2} = 540 \text{ MPa}$
Geometrie:	rund
Schnittfläche pro Werkstück:	20.106 mm ²
Schnittgeschwindigkeit:	20 m/s
Vorschubdruck:	0,15 MPa
Werkzeug:	9,5 m; galvanisch belegt
Verdrillung:	1 x pro laufendem m Seillänge

Abbildung 79: Trennzeiten der Versuchsreihe R7

Die Trennzeit hat sich, ausgehend von dem interpolierten Wert zu Beginn von W1 bis zum Ende von W11, um 29,2 % erhöht. Zu Beginn lag die Schnittleistung, wieder für die theoretische Trennzeit ohne Gummiüberzug, bei 37,73 mm²/s. Für den letzten Versuch W11 lag diese Schnittleistung nur noch bei 29,35 mm²/s. Für eine Fläche von 220.000 mm² benötigte die Seilsäge insgesamt 6.740 Sekunden. Somit ergibt sich eine Gesamtschnittleistung von 32,75 mm²/s.

Des Weiteren wurde, wie Abbildung 80 zu entnehmen ist, die angefallenen Späne der einzelnen Versuche in der Reihe klassifiziert. Der lineare Trend der mittleren Spangröße nimmt im Durchschnitt über alle Versuche um jeweils 1,70 % ab. Die durchschnittliche mittlere Spangröße in der Gesamtheit aller Versuche liegt bei 209,7 µm und fällt damit gegenüber den anderen Versuchsreihen ebenfalls hoch aus.

Es ist abermals zu beobachten, dass die mittlere Spangröße in der Gesamtheit aller Versuche gegenüber den anderen Versuchsreihen sehr hohe Werte annimmt, was bis zum jetzigen Stand der Erkenntnisse und unter Berücksichtigung der hohen Leistungswerte auf einen effektiven Trennprozess hinweist. Je größer die Spangröße, desto effizienter der Trennprozess. Da sich diese Tatsache auch bei runden Geometrien abzeichnet, wird diese Theorie untermauert. Im Vergleich zur Versuchsreihe R2, deren mittlere Spangröße über alle Versuche bei 178,4 μm lag, grenzt sich die Versuchsreihe R7 mit 209,7 μm deutlich ab.

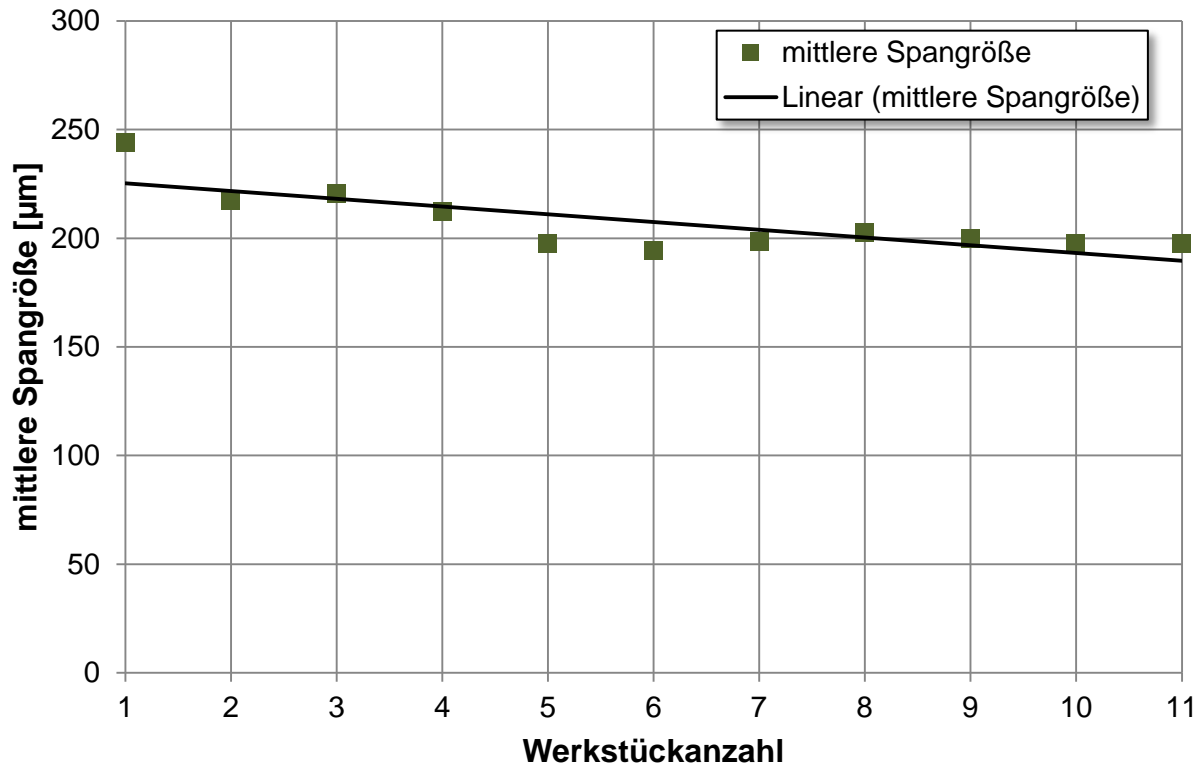
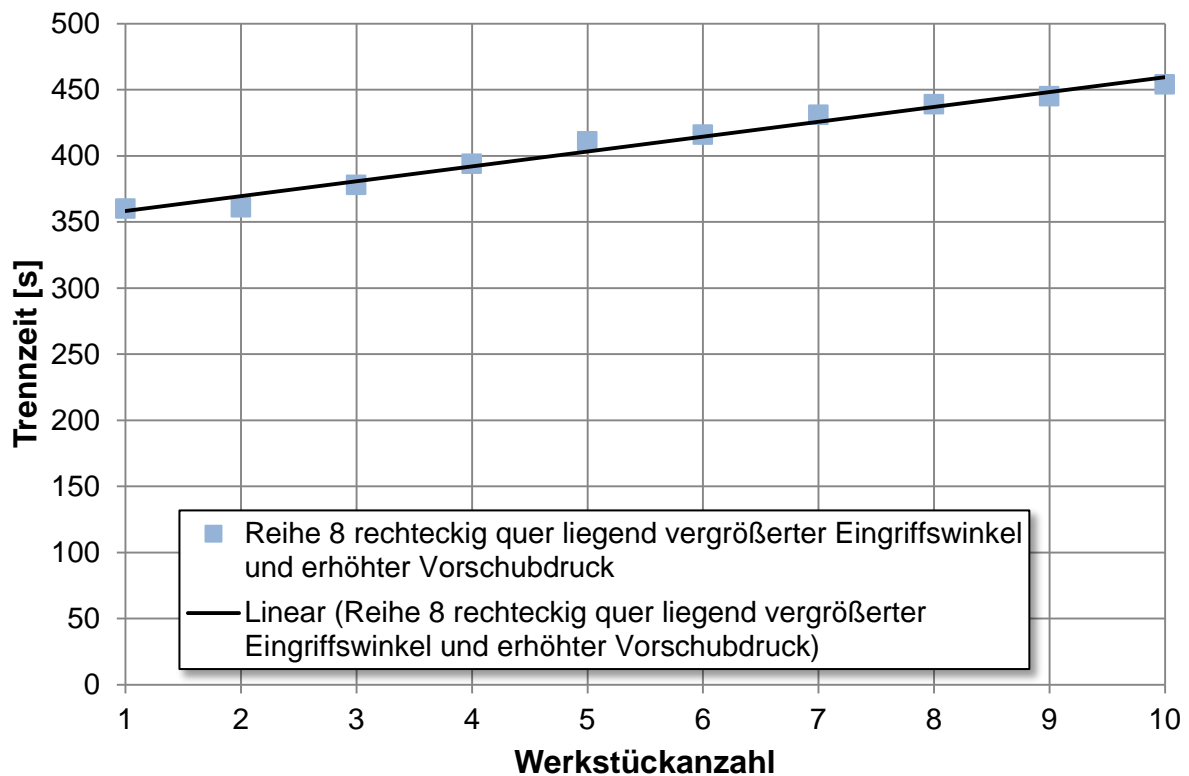


Abbildung 80: Mittlere Spangröße für die Versuche der Reihe R7

Es sollte auch in dieser Versuchsreihe noch einmal darauf hingewiesen werden, dass das Werkstück lediglich um 5 cm nach unten positioniert wurde, was einer Erhöhung des mittleren Eingriffswinkels um $5,5^\circ$ entspricht. Dieser Unterschied hat, wie sich anhand der Daten nachvollziehen lässt, signifikante Auswirkungen auf den Trennprozess.

4.8 Versuchsreihe 8 - quer, erhöhter Vorschubdruck

In der Versuchsreihe R8 wurde die Auswirkung des Vorschubdrucks untersucht. Die Versuchsanordnung entspricht der Versuchsanordnung der Versuchsreihe R6 und kann Abbildung 75 entnommen werden. Als Geometrie wurden wieder rechteckige, quer liegende Werkstücke aus dem Material Stahl getrennt. Als Schnittgeschwindigkeit v_c wurde unverändert ein Wert von 20 m/s gewählt, jedoch wurde der Vorschubdruck von 0,15 MPa auf 0,2 MPa erhöht. Für die Versuchsreihe kam ein neues Seil zum Einsatz. Das Diamantseil wurde während der Versuchsreihe nicht getauscht, sondern alle Schnitte wurden mit dem gleichen Diamantseil durchgeführt.



Material:	Vergüteter Baustahl
	$R_{p0,2} = 540 \text{ MPa}$
Geometrie:	Rechteck, quer liegend
Schnittfläche pro Werkstück:	20.000 mm ²
Schnittgeschwindigkeit:	20 m/s
Vorschubdruck:	0,2 MPa
Werkzeug:	9,5 m; galvanisch belegt
Verdrillung:	1 x pro laufendem m Seillänge

Abbildung 81: Trennzeiten der Versuchsreihe R8

Abbildung 81 zeigt die Trennzeiten der Versuchsreihe R8 für rechteckige, quer liegende Werkstücke, die wie in Versuchsreihe R6 tiefer positioniert wurden als in Versuchsreihe R1 und zusätzlich mit einem erhöhten Vorschubdruck von 0,2 MPa getrennt wurden. Wie bereits in Versuchsreihe R1 und R6 ist auch hier wieder für den ersten Versuch eine Trennzeiterhöhung aufgrund des erstmaligen Gebrauchs des Diamantseils und dem damit verbundenen Freischneiden des Gummibelags für den ersten Versuch zu beobachten.

Die Trennzeiten für W1 (360 Sekunden) und W2 (361 Sekunden) weichen somit kaum voneinander ab. Die Steigerung der Trennzeit in den nachfolgenden Versuchen liegt im Durchschnitt bei ca. 2,6 %. Wird diese mittlere Steigerung von den nachfolgenden Versuchen auf den ersten Versuch interpoliert, so ergibt sich eine Trennzeit von 351 Sekunden. Die Differenz zwischen gemessener (360 Sek.) und interpolierter Trennzeit (351 Sek.) für den ersten Versuch beläuft sich folglich auf 9 Sekunden.

Die Trennzeit hat sich ausgehend von dem interpolierten Wert am Start für W1 bis zum Ende der Versuchsreihe mit W10 um 26 % erhöht. Zu Beginn lag die Schnittleistung, wieder für die theoretische Trennzeit ohne Gummiüberzug, bei 56,98 mm²/s, was die bis dahin höchste Schnittleistung aller Versuchsreihen darstellt. Für den letzten Versuch W10 lag diese Schnittleistung noch bei 44,05 mm²/s. Für eine Fläche von 200.000 mm² benötigte die Seilsäge insgesamt 4.080 Sekunden. Somit ergibt sich eine Gesamtschnittleistung von 49,01 mm²/s.

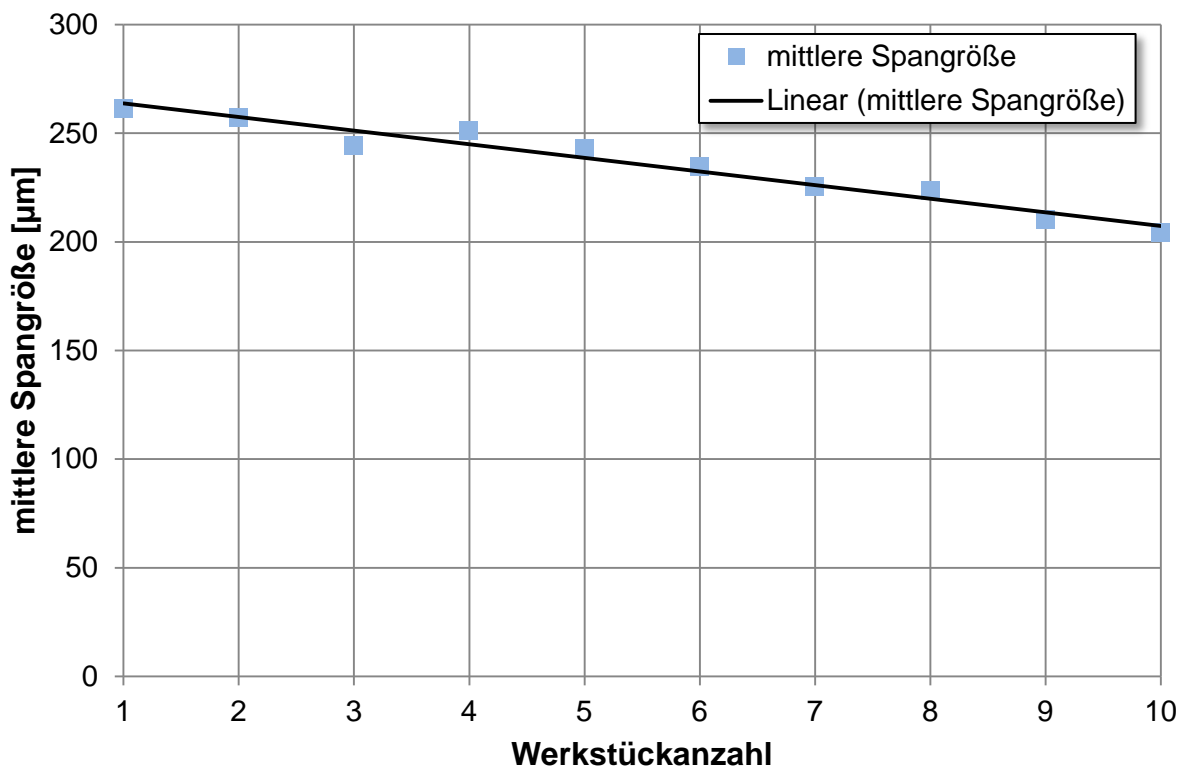


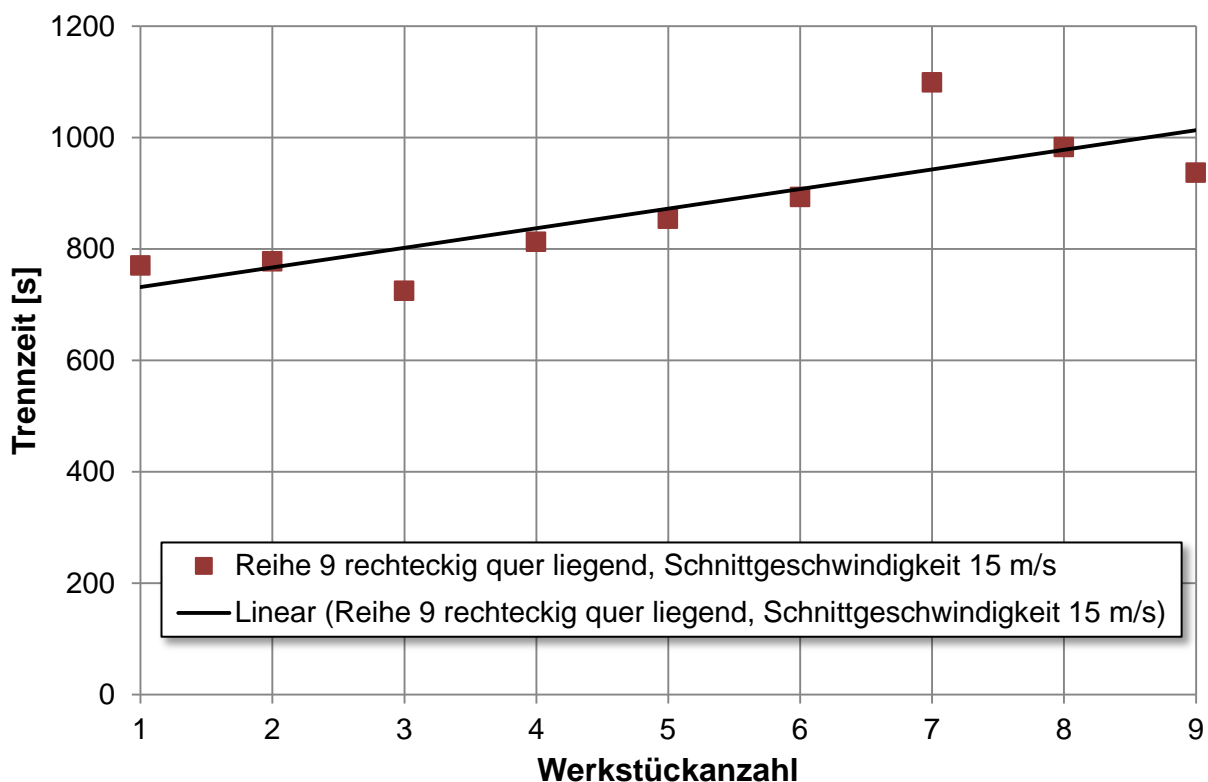
Abbildung 82: Mittlere Spangröße für die Versuche der Reihe R8

Auch in dieser Versuchsreihe wurden die angefallenen Späne der einzelnen Versuche klassifiziert und die resultierenden Ergebnisse können Abbildung 82 entnommen werden. Es wurde im Vergleich zu den anderen Versuchsreihen die bis dahin größte mittlere Spangröße mit 261,49 µm registriert. Der lineare Trend der mittleren Spangröße nimmt im Durchschnitt über alle Versuche um jeweils 2,64 % ab. Die durchschnittliche mittlere Spangröße in der Gesamtheit aller Versuche liegt bei 235,51 µm und bildet damit im Vergleich zu den anderen Versuchsreihen den höchsten Wert aller Versuchsreihen aus.

Des Weiteren ist zu beobachten, dass die mittlere Spangröße in der Gesamtheit aller Versuche gegenüber den anderen Versuchsreihen die höchsten gemessenen Werte annimmt. Daraus lässt sich folgern: je größer die Spangröße, desto effektiver der Trennprozess.

4.9 Versuchsreihe 9 - quer, verminderte Schnittgeschwindigkeit

In der Versuchsreihe R9 wurde die Auswirkung der Schnittgeschwindigkeit untersucht. Die Versuchsanordnung entspricht der Versuchsanordnung der Versuchsreihe R1 und kann Abbildung 61 entnommen werden. Als Geometrie kamen wieder rechteckige, quer liegende Werkstücke zum Einsatz, die aus dem Material Stahl bestehen. Der Vorschubdruck wurde auf 0,15 MPa gesetzt, jedoch wurde die Schnittgeschwindigkeit von 20 m/s aus den vorherigen Versuchsreihen wieder auf 15 m/s herabgesenkt, um dessen Auswirkung hinsichtlich der Trennleistung zu untersuchen. Für die Versuchsreihe kam ein neues Seil zum Einsatz. Das Diamantseil wurde während der Versuchsreihe nicht getauscht, sondern alle Schnitte wurden mit dem gleichen Diamantseil durchgeführt.



Material:	Vergüteter Baustahl
	$R_{p0,2} = 540 \text{ MPa}$
Geometrie:	Rechteck, quer liegend
Schnittfläche pro Werkstück:	20.000 mm ²
Schnittgeschwindigkeit:	15 m/s
Vorschubdruck:	0,15 MPa
Werkzeug:	9,5 m; galvanisch belegt
Verdrillung:	1 x pro laufendem m Seillänge

Abbildung 83: Trennzeiten der Versuchsreihe R9

Da jeweils pro Werkstück zwei Schnitte durchgeführt wurden, mussten für die Versuchsreihe R8 mit neun Versuchen insgesamt fünf Werkstücke verwendet werden. Abbildung 83 zeigt die Trennzeiten der Versuchsreihe R9, in der rechteckige, quer liegende Werkstücke mit

einer reduzierten Schnittgeschwindigkeit von 15 m/s getrennt wurden. Die Erhöhung der Trennzeit zwischen den Versuchen lag im Durchschnitt bei ca. 3,0 %. Die Trennzeit hat sich im Verlauf von W1 bis zum Ende von W9 von 770 Sekunden auf 937 Sekunden erhöht, was einem Anstieg von 22 % entspricht. Zu Beginn der Versuchsreihe lag die Schnittleistung für W1 bei 25,97 mm²/s und für den letzten Versuch W9 lag die Schnittleistung bei einem Wert von 21,34 mm²/s. Die Gesamtschnittleistung der Reihe mit einer Gesamtfläche von 180.000 mm² und einer Gesamttrenndauer von 7.852 Sekunden lag bei 22,92 mm²/s.

Die Versuche W3 und W7 heben sich von den anderen Versuchen ab und stellen „Ausreißer“ dar. Besonders sichtbar wird dies durch den Versuch W7, was möglicherweise an der geringen Schnittgeschwindigkeit liegen kann. Je geringer diese Schnittgeschwindigkeit, desto größer sind die Abweichungen zwischen den einzelnen Versuchen und desto unschärfer werden die Vorhersagen zur Trennzeit.

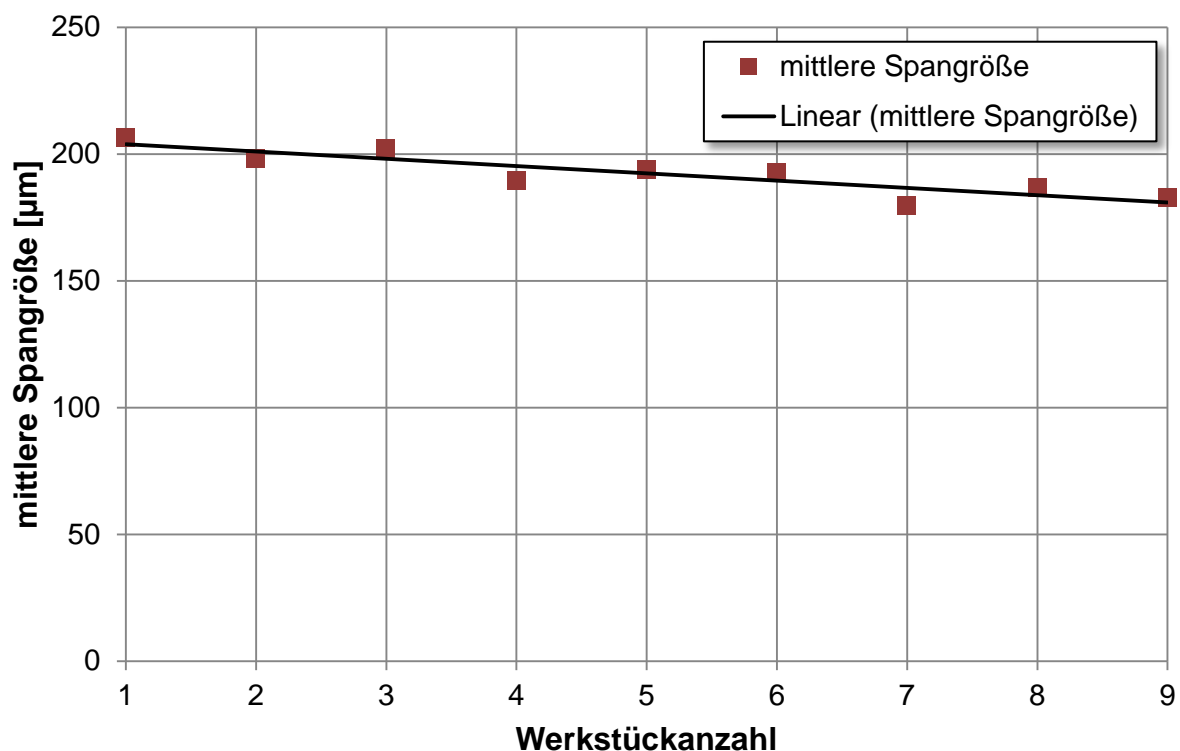


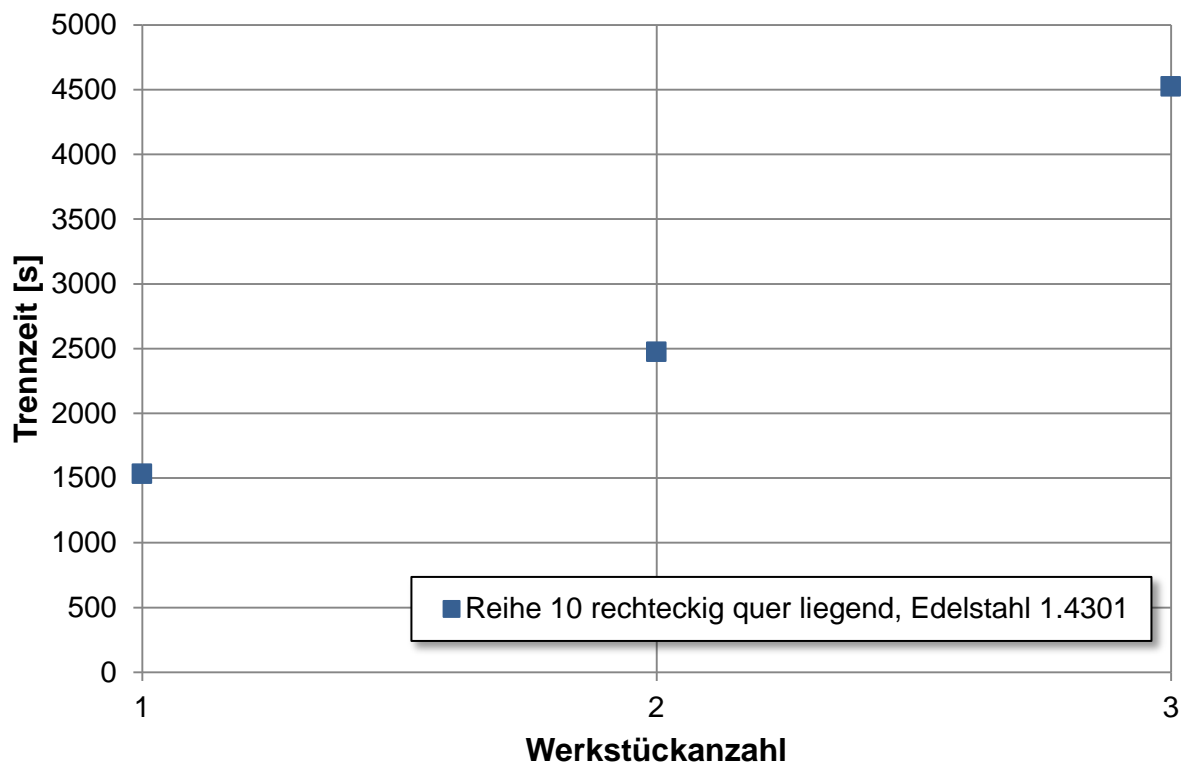
Abbildung 84: Mittlere Spangröße für die Versuche der Reihe R9

Abbildung 84 zeigt die Klassifizierung der in den einzelnen Versuchen angefallenen Späne. Der lineare Trend der mittleren Spangröße nimmt im Durchschnitt über alle Versuche um jeweils 1,67 % ab. Die durchschnittliche mittlere Spangröße liegt in allen Versuchen bei 192,29 µm. Ausreißer ist hier ebenfalls der Versuch W7, bei dem die Trennzeit ungewöhnlich hoch war, was folglich auch zu der Bildung eines feineren Spans führte, der im Schnitt nur noch bei 169,51 µm lag.

Festzuhalten ist, dass die Schnittgeschwindigkeit nur geringen Einfluss auf den Trennprozess hat. Was jedoch zu beachten ist, dass bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten die Unschärfe in der Trennzeit und der Schnittleistung steigt und die Werte erheblich voneinander abweichen können.

4.10 Versuchsreihe 10 - quer, nichtrostender Stahl

In der Versuchsreihe R10 wurde das Material variiert. Statt Werkstücken aus vergütetem Baustahl wurden Werkstücke aus nichtrostendem Stahl 1.4301 verwendet. Die Versuchsanordnung entspricht der Versuchsanordnung der Versuchsreihe R1 und kann Abbildung 61 entnommen werden. Als Geometrie wurden rechteckige, quer liegende Werkstücke getrennt. Als Schnittgeschwindigkeit v_c wurde der Standardwert von 20 m/s eingestellt und auch der Vorschubdruck in Höhe von 0,15 MPa wurde beibehalten. Für die Versuchsreihe kam ein neues Seil zum Einsatz. Das Diamantseil wurde während der Versuchsreihe nicht getauscht, sondern alle Schnitte wurden mit dem gleichen Diamantseil durchgeführt.



Material:	nichtrostender Stahl 1.4301
	$R_{p0,2} = 246 \text{ MPa}$
Geometrie:	Rechteck, quer liegend
Schnittfläche pro Werkstück:	20.000 mm ²
Schnittgeschwindigkeit:	20 m/s
Vorschubdruck:	0,15 MPa
Werkzeug:	9,5 m; galvanisch belegt
Verdrillung:	1 x pro laufendem m Seillänge

Abbildung 85: Trennzeiten der Versuchsreihe R10

Abbildung 85 zeigt die Trennzeiten der Versuchsreihe R10 für rechteckige, quer liegende Werkstücke, die wie in Versuchsreihe R1 positioniert wurden, sich jedoch im Material unterscheiden. Eine Trennzeiterhöhung für den ersten Versuch aufgrund des erstmaligen Gebrauchs des Diamantseils und der damit verbundenen Trennzeiterhöhung wegen des Freischneidens des Gummibelags war nicht zu beobachten. Die Versuchsreihe musste

bereits nach drei Versuchen abgebrochen werden, weil das Diamantseil nicht mehr in einem schneidfähigen Zustand war. Die Diamantzwischenräume auf dem Diamantseil haben sich aufgrund der hohen Duktilität des nichtrostenden Stahls mit Spänen zugesetzt, so dass sich die Spanabtragstiefe verringerte und der Verschleiß an den Diamanten stark anstieg, beziehungsweise die Diamanten bedeckt waren. Nach drei Versuchen waren die Zwischenräume am Diamantseil vollständig gefüllt und es konnte keine Schneidwirkung mehr mit dem Diamantseil erzielt werden.

Die Erhöhung der Trennzeit zwischen den Versuchen lag im Durchschnitt für die drei Versuche bei ca. 72 %. Die Trennzeit hat sich im Verlauf von W1 bis zum Ende von W3 von 1534 Sekunden auf 4526 Sekunden erhöht, was einem Anstieg in Höhe von 195 % entspricht. Zu Beginn der Versuchsreihe lag die Schnittleistung für W1 bei 13,03 mm²/s und für den letzten Versuch W3 bei 4,41 mm²/s. Die Gesamtschnittleistung der Reihe mit einer Gesamtfläche von 60.000 mm² und einer Gesamttrenndauer von 8.536 Sekunden lag bei 7,03 mm²/s.

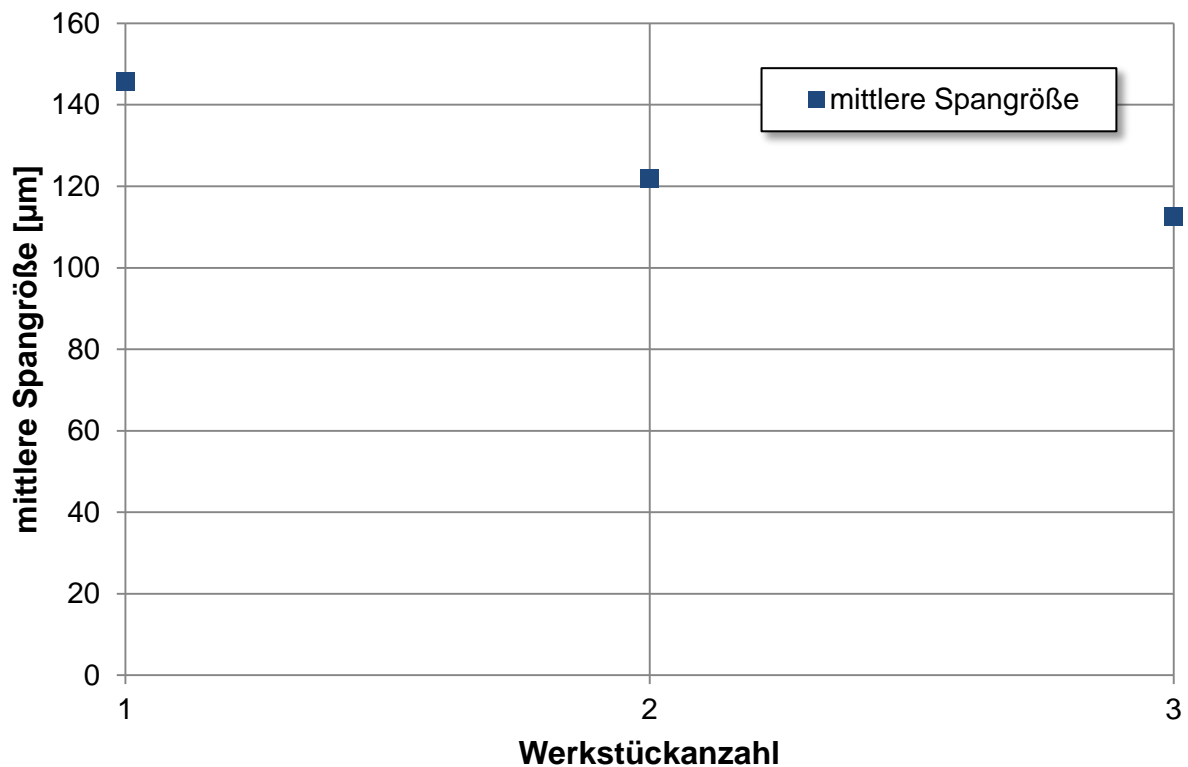


Abbildung 86: Mittlere Spangröße für die Versuche der Reihe R10

Abbildung 86 können die Ergebnisse der Klassifizierung der angefallenen Späne für die einzelnen Versuche entnommen werden. Die Abnahme der mittleren Spangröße von Versuch W1 zu W2 liegt bei 16,3 % und von Versuch W2 zu W3 bei 7,4 %. Die durchschnittliche mittlere Spangröße in der Gesamtheit aller Versuche liegt bei 126,69 µm und bildet damit gegenüber den anderen Versuchsreihen den niedrigsten Wert aller Versuchsreihen aus. Die hohen Trennzeiten erklären die niedrigen mittleren Spangrößen.

Es hat sich gezeigt, dass sich nichtrostender Stahl durch seine hohe Kaltverfestigungsneigung, die niedrige Wärmeleitfähigkeit und die gute Zähigkeit sehr schlecht mit einem Diamantseil trennen lässt. Die Versuchsreihe musste deshalb schon

vorzeitig beendet werden. Schon das erste Werkstück aus nichtrostendem Stahl benötigte eine im Vergleich zu Stahl drei Mal höhere Trennzeit.

4.11 Versuchsreihe 11 - rund, nichtrostender Stahl

In der Versuchsreihe R11 wurde, ebenfalls wie in Reihe R10, das Material nichtrostender Stahl 1.4301 verwendet. Jedoch wurde als Geometrie kein rechteckiges, sondern ein rundes Werkstück getrennt. Die Versuchsanordnung entspricht der Anordnung von Versuchsreihe R2 und kann Abbildung 64 entnommen werden. Als Schnittgeschwindigkeit v_c wurde der Standardwert von 20 m/s gewählt und auch der Vorschubdruck in Höhe von 0,15 MPa wurde beibehalten. Für die Versuchsreihe kam ein neues Seil zum Einsatz. Das Diamantseil wurde während der Versuchsreihe nicht getauscht, sondern beide Schnitte wurden mit dem gleichen Diamantseil durchgeführt.



Material:	nichtrostender Stahl 1.4301 $R_{p0,2} = 246 \text{ MPa}$
Geometrie:	rund
Schnittfläche pro Werkstück:	20.106 mm ²
Schnittgeschwindigkeit:	20 m/s
Vorschubdruck:	0,15 MPa
Werkzeug:	9,5 m; galvanisch belegt
Verdrillung:	1 x pro laufendem m Seillänge

Abbildung 87: Trennzeiten der Versuchsreihe R11

Abbildung 87 zeigt die Trennzeiten der Versuchsreihe R11 für runde Werkstücke, die wie in Versuchsreihe R1 positioniert wurden, sich jedoch im Material unterscheiden. Die Versuchsreihe musste bereits nach nur zwei Versuchen abgebrochen werden, da das

Diamantseil nicht mehr schneidfähig war. Auch hier haben sich die Diamantzwischenräume auf dem Diamantseil aufgrund der hohen Duktilität des nichtrostenden Stahls mit Spänen zugesetzt, so dass sich die Spanabtragstiefe verringerte und der Verschleiß an den Diamanten stark anstieg, beziehungsweise die Diamanten bedeckt wurden. Nach den zwei Versuchen waren die Zwischenräume am Diamantseil vollständig gefüllt und eine Schneidwirkung war nicht mehr gegeben. Ein dritter Schnitt mit dem Diamantseil wäre nicht mehr durchführbar gewesen, weshalb auch diese Versuchsreihe vorzeitig beendet werden musste.

Die Trennzeit hat sich von 1.785 Sekunden auf 4.981 Sekunden erhöht, was einem Anstieg von 179 % entspricht. Zu Beginn der Versuchsreihe lag die Schnittleistung für W1 bei 11,26 mm²/s und für den Versuch W2 lag die Schnittleistung bei einem Wert von 4,04 mm²/s. Die Gesamtschnittleistung der Reihe mit einer Gesamtfläche von 40.000 mm² und einer Gesamttrenndauer von 6.766 Sekunden lag bei 5,94 mm²/s.



Abbildung 88: Mittlere Spangröße für die Versuche der Reihe R11

Auch in dieser Versuchsreihe wurden die angefallenen Späne der beiden Versuche klassifiziert und kann Abbildung 88 entnommen werden. Der lineare Trend ist erst ab drei Werten zu errechnen, weshalb der prozentuale Abfall zwischen beiden Versuchen genommen wird. Die mittlere Spangröße nimmt um 11,17 % ab. Die durchschnittliche mittlere Spangröße über beide Versuche beträgt 130,84 µm und liegt im Vergleich zu der vorherigen Versuchsreihe R10 mit 126,69 µm nur knapp darüber. Die hohen Trennzeiten erklären die niedrigen mittleren Spangrößen. Auch diese Untersuchung stützt die Theorie, dass ab einer mittleren Spangröße von kleiner 150 µm der Trennprozess als ineffektiv zu betrachten ist.

Beide Versuchsreihen mit nichtrostendem Stahl haben gezeigt, dass dieser sich durch seine hohe Kaltverfestigungsneigung, die niedrige Wärmeleitfähigkeit und die gute Zähigkeit sehr

schlecht mit einem Diamantseil trennen lässt. Die Versuchsreihen mussten deshalb schon vorzeitig beendet werden. Dennoch ist festzuhalten, dass auch für den gut vergleichbaren ersten Schnitt, analog zu Stahl, eine höhere Trennzeit bei den runden gegenüber den rechteckigen, quer liegenden Werkstücken zu verzeichnen war.

5 Zusätzliche Untersuchungen

Neben den zuvor beschriebenen Versuchsreihen wurden zusätzliche Untersuchungen durchgeführt, um einzelne spezielle Fragen zu beantworten. Auf diese Weise soll das Wissen über die Prozesse bei einer Seilsäge vertieft und das Verständnis für diese Technologie weiter erhöht werden.

5.1 Partielle Werkstückunterteilung

Auf die Werkstücke wirken während eines Schnittes aufgrund ihrer Geometrie an verschiedenen Stellen und zu unterschiedlichen Zeitpunkten unterschiedlich hohe Kräfte. Die Kraft wird über die Seilspannung, die durch einen Zylinder aufgebracht wird, also dem Vorschub, auf das Werkstück übertragen. An den Kontaktstellen zwischen Werkstück und Werkzeug entstehen Wirkflächenpaare, an denen sich während des Prozesses der Abtrag vollzieht.

Um die genauen Kraftverläufe, die im Verlauf eines Schnittes auf ein Werkstück wirken, darzustellen, wurde eine rechteckige, quer liegende Werkstückprobe in fünf Blöcke geteilt. Die zu trennende Gesamtfläche besitzt eine Größe von 20.000 mm^2 , jeder Block eine Fläche von 4.000 mm^2 .

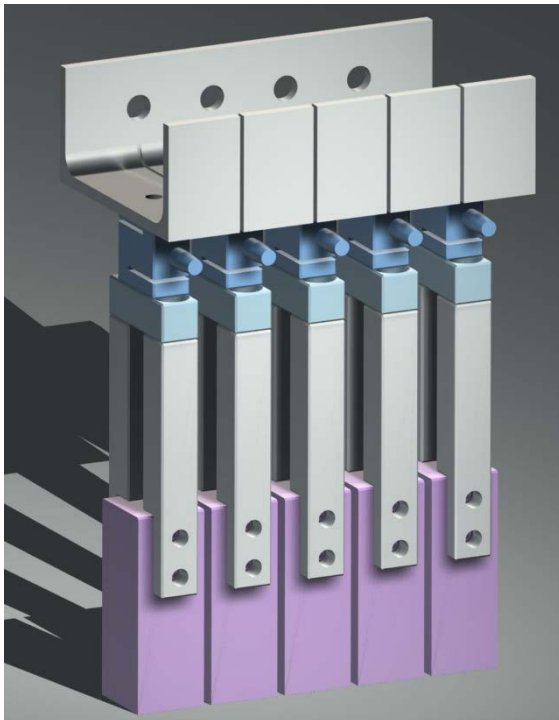


Abbildung 89: 3D-Modell der Versuchseinrichtung

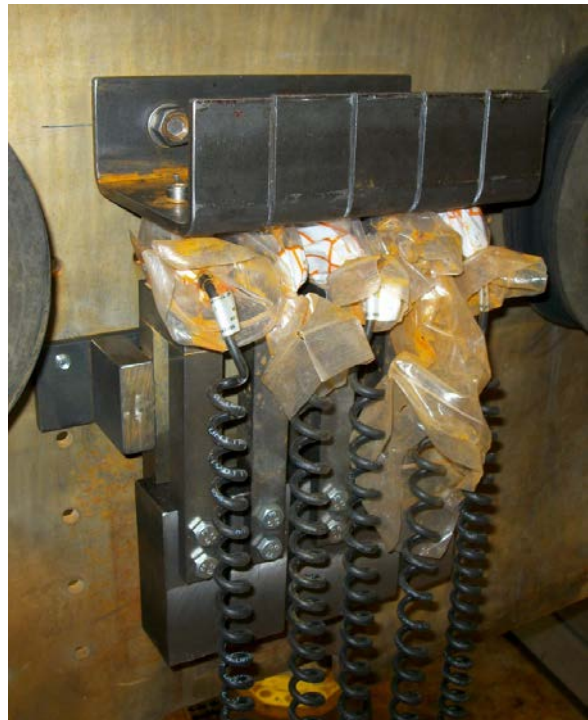


Abbildung 90: Realer Aufbau am Versuchsstand

Die Versuchseinrichtung ist, wie in Abbildung 89 dargestellt, aufgebaut. Um die komplette Versuchseinrichtung an der Wechsellvorrichtung zu befestigen, wurde ein U-Profil an ihr angebracht. Das U-Profil ist längs geschlitzt, so dass sich die einzelnen Sensoren so wenig wie möglich gegenseitig beeinflussen. Aus diesem Grund wurde auch ein Abstand zwischen den einzelnen Blöcken von 5 mm gesetzt. Durch das Schlitzen wird das U-Profil ebenfalls in

fünf Segmente unterteilt. Unter jedem Segment wird eine Scherkkraftwägezelle (siehe Abschnitt 3.2.2.1 Sensoren) angebracht. Um die Sensoren zusätzlich vor Wasser zu schützen, wurden diese mit Kunststoffhüllen umschlossen. Unter den Sensoren wurde jeweils eine Gabel angebracht, die wiederum die einzelnen Blöcke hält. Die Gabeln mussten so groß dimensioniert werden, dass das Diamantseil bei Schnittende nicht auf die Scherkkraftwägezellen treffen kann. Diese könnten sonst erheblich beschädigt werden.

In Abbildung 90 ist ersichtlich, dass die Gabeln überdies noch einmal anhand von Abstandshaltern, die an der Wechsellvorrichtung befestigt sind, auseinander gehalten werden. Es stellte sich im Laufe der ersten Versuche heraus, dass die während des Trennprozesses auftretenden Momente durch die langen Gabeln zu groß waren, so dass ein Sensor beschädigt wurde. Durch die Abstandhalter wurden die Momente verringert und der Versuch konnte durchgeführt werden.

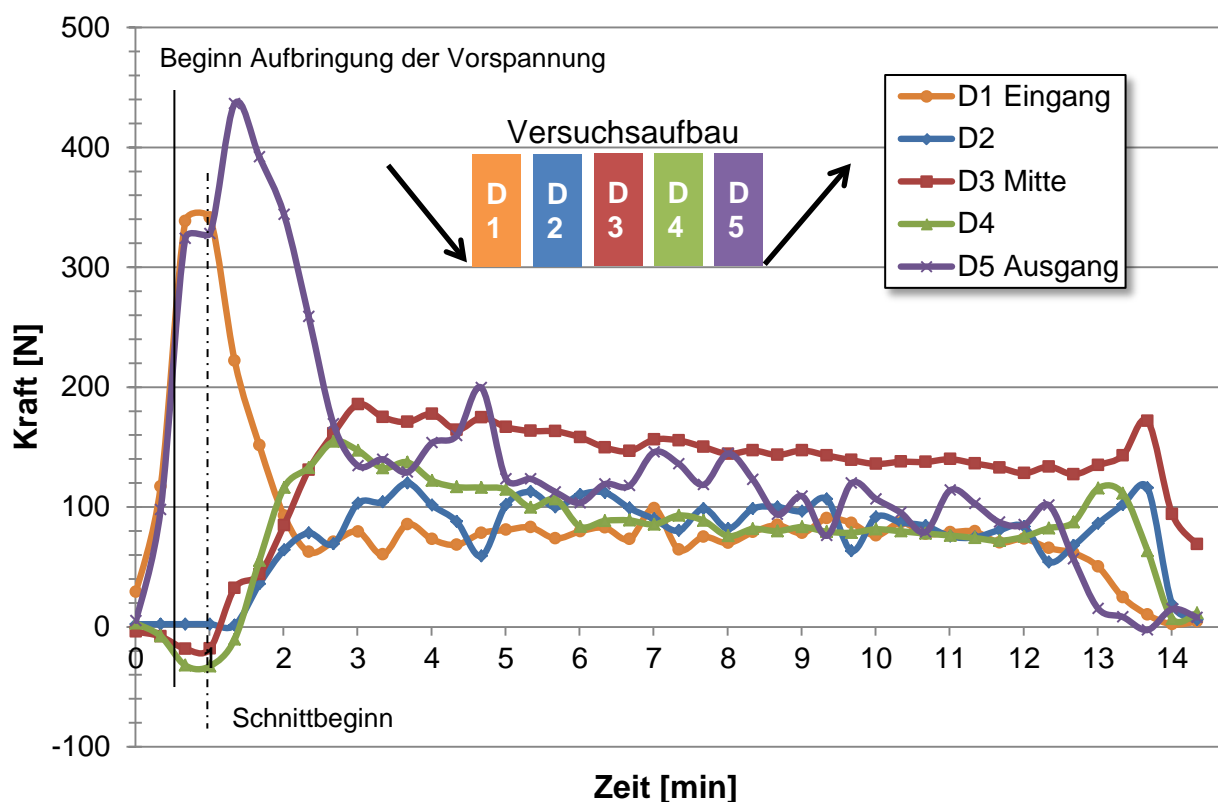


Abbildung 91: Diagramm der Kraftverläufe über der Zeit, mit gemittelten Werten über eine Zeitspanne von 20 Sekunden

Abbildung 91 zeigt die Kraftverläufe eines kompletten Schnittes über die Gesamttrenndauer. Die Werte besitzen eine große Streuung, so dass sie zusammen in einem Diagramm, nicht darstellbar gewesen wären. Aufgrund dieses Umstands wurden die Werte über 20 Sekunden gemittelt. Die Blöcke sind von D1 bis D5 durchnummeriert und nach dem zeitlichen Kontakt in Laufrichtung mit den Diamantsegmenten geordnet.

Zu Beginn wurden die Sensoren auf Null gesetzt und lediglich die Seilspannung in Höhe von 0,15 MPa aufgebracht. Die Seilspannung zeigt sich deutlich in den beiden äußeren Blöcken D1 und D5, da sich diese durch ihre Geometrie als einzige an den Kanten im Eingriff befinden. Die Werte scheinen im Diagramm nur langsam zu steigen, was jedoch dem Effekt der Mittelung geschuldet ist. Die Seilspannung liegt sofort an und bleibt bis zum Beginn des

Schnitts konstant. Die Blöcke D3 und D4 werden durch die aufgebrachte Seilspannung auf D1 und D5 sogar leicht entlastet, was gleichzeitig als Fehlerabweichung dient, da eine Entlastung durch die Seilspannung auf die beiden Blöcke nicht möglich ist.

Die Bewegung des Diamantseils und somit der eigentliche Schnittbeginn, gekennzeichnet durch die gestrichelte Linie im Diagramm, startet etwa eine Minute nach Aufzeichnungsbeginn, durch das daraufhin schnelle Beschleunigen des Diamantseils, auf die Endgeschwindigkeit von 20 m/s. Kurz nach dem Start zeigt sich eine deutliche Krafterhöhung bei D5 auf der sogenannten „Austrittsseite“. D5 wird als letztes der Blöcke von dem Diamantseil berührt, weshalb von einem „Austritt“ gesprochen werden kann. Grund hierfür ist, dass das Diamantseil zwischen dieser Austrittsstelle und dem Antriebsrad die höchste Seilspannung aufweist. Durch den erhöhten Widerstand an der Austrittsseite, an der das Seil sozusagen „festgehalten“ wird und dem Antriebsrad, das das Diamantseil von dort aus „wegziehen“ möchte, entsteht ein lokales Seilspannungsmaximum. Der Effekt ist bekannt und analog bei einem Riemengetriebe zu beobachten. Bei einem Riemengetriebe wird je nach Belastung vom ziehenden Trum (Lasttrum) an der Austrittsseite oder vom gezogenen Trum (Leertrum) an der Eintrittsseite gesprochen.

Auf der Austrittsseite erhöht sich die Kraft für D5 von 330 N kurzzeitig auf 440 N, was einem Anstieg von 33 % entspricht. D1 fällt im gleichen Zeitraum ab, da das lokale Seilspannungsmaximum zwischen D5 und dem Antriebsrad entlastend auf das restliche Diamantseil wirkt. Kurz nachdem die Ecken der Blöcke D1 und D5 abgetragen worden sind, befindet sich das Diamantseil ebenfalls nach und nach im Eingriff mit den mittleren Blöcken D2, D3 und D4, weshalb diese langsam aber stetig mehr Kraft erfahren.

Ab der dritten Minute sind die äußeren Kanten der Randblöcke abgetragen und jeder einzelne Block befindet sich in Kontakt mit dem Diamantseil. Es zeigt sich, dass der Block auf der Austrittsseite D5 gegenüber seinem Pendant auf der Eintrittsseite D1 weiterhin erhöht beansprucht wird. Dies bleibt über den ganzen Versuch der Fall, bis schließlich D5 komplett getrennt ist. Die Kraftverteilung der Blöcke D2 und D4 ist relativ gleichmäßig. Es ist davon auszugehen, dass sie sich nahezu symmetrisch verhalten. Zu Beginn liegt D4 gegenüber D5 leicht höher, was dem Effekt der lokalen maximalen Seilspannung zugeordnet werden kann. Der mittlere Block D3 erfährt, sobald er vollständig im Eingriff ist, während der Trennzeit die höchste Kraft. An dem Kraftverlauf von Block D3 ist gut zu erkennen, wie mit fallendem Eingriffswinkel auch die Kraft langsam abnimmt. Zu Beginn liegt die Kraft, die Block D3 erfährt, bei 190 N und gegen Ende nur noch bei 115 N.

Ab etwa 12 Minuten und 30 Sekunden befindet sich der Trennprozess im Endstadium. Zuerst wird der Block D5 und kurz darauf Block D1 getrennt. Etwa eine Minute später werden die Blöcke D2 und D4 getrennt. Durch den Wegfall der beiden äußeren Blöcke erfahren D2 und D4 noch einmal eine erhöhte Kraftaufnahme, da die Seilspannung immer konstant gehalten wird. Dies hat zur Folge, dass bei abnehmender Fläche die spezifische Krafteinwirkung auf die verbleibenden Blöcke zunimmt. Nachdem die Blöcke D2 und D4 getrennt wurden, folgt der letzte mittlere Block D3 nach. Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass der Schnitt vor allem zu Beginn trotz einiger Unregelmäßigkeiten als symmetrisch betrachtet werden kann. Der Schnitt erfolgt von außen nach innen und ist bei den Blöcken D1 und D5 fast exakt symmetrisch, gefolgt von D2, D4 und D3.

Abbildung 92 zeigt das Schnittbild der fünf getrennten Blöcke. Gut zu erkennen sind die ausgebildeten Schnittriefen. Gerade zu Beginn ist der Eingriffswinkel noch groß und das

Schnittbild sehr rau. Dies ändert sich im Verlauf zu einer immer glatteren Oberfläche, da aufgrund des geringeren Eingriffswinkels weniger Normalkraft erzeugt wird und deshalb mehr Zeit pro Flächeneinheit benötigt wird. Gegen Ende, nach Wegfall der Blöcke D1 und D5, nimmt die Rauheit noch einmal sichtbar zu, da sich der spezifische Druck, wie bereits beschrieben, auf die verbleibenden Blöcke noch einmal erhöht. Ebenfalls gut zu erkennen ist das fast symmetrische Schnittbild, das sich jedoch leicht in Richtung D2, also zur Eintrittsseite, verschiebt, da dort die geringeren Seilspannungen herrschen und somit weniger Abtrag erfolgt.

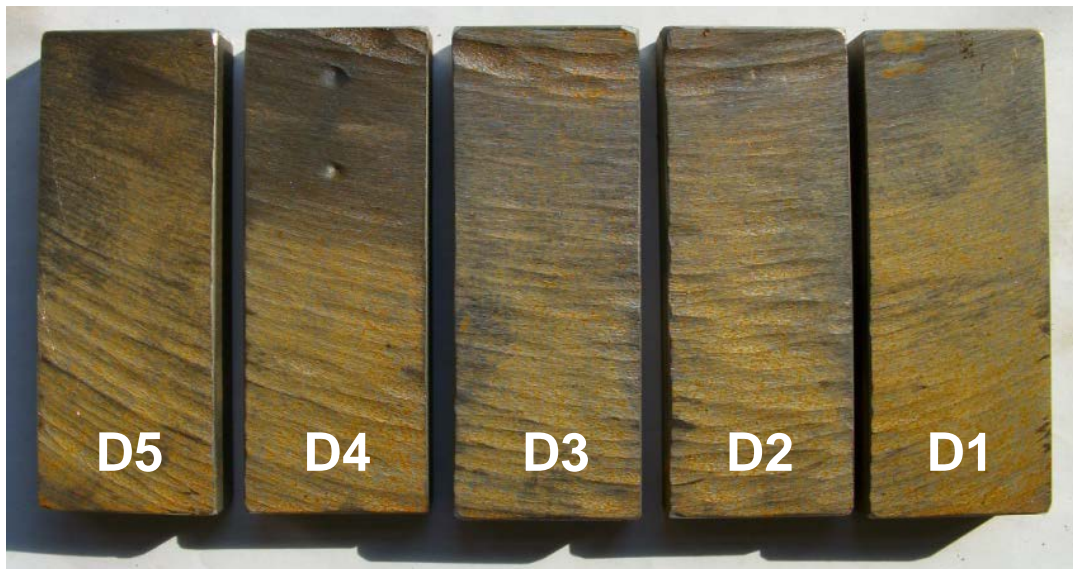


Abbildung 92: Schnittbild der getrennten Blöcke D1, D2, D3, D4 und D5

Des Weiteren ist es relativ gut zu erklären, dass die höchste Kraft genau auf die Mitte von Block D3 ausgeübt wird. Ursprünglich beabsichtigt war, dass neben der y-Komponente mit den Scherkraftwägezellen auch die x-Komponente erfasst werden sollte. Dazu wären jedoch Kraftsensoren nötig gewesen, die die Kraftkomponenten F_x und F_y in den beiden Richtungen aufnehmen können. Aufgrund der hohen Momente, bedingt durch die Länge der Gabel und den begrenzten Raum, wäre dies jedoch nur unter schwierigen Umständen realisierbar gewesen, weshalb davon abgesehen wurde. Darüber hinaus muss beachtet werden, dass die Werkstücke vollständig mit Wasser bedeckt sind und deshalb auch die sich in unmittelbarer Umgebung befindlichen Sensoren wasserdicht ausgeführt werden müssen.

Abbildung 93 zeigt die Eingriffssituation, die sich an den partiellen Blöcken ergibt, sobald die Seilspannung aufgebracht wird. Da das Diamantseil eine hohe Flexibilität aufweist, ergeben sich für jeden Block andere Eingriffssituationen. Bei Block D1 liegt das Diamantseil, beziehungsweise das Diamantsegment, zuerst nur an der Kante an. Bedingt durch die Eingriffssituation wird die resultierende Kraft F_{res} aus dem Kräfteparallelogramm der beiden Kraftrichtungen F_x und F_y gebildet. Die resultierende Kraft verhält sich immer orthogonal zu dem Diamantsegment. Die Scherkraftwägezellen, können nicht die resultierende Kraft F_{res} messen, sondern nur den Anteil in y-Richtung, also die Kraft F_y . Der Kraftanteil in x-Richtung wird mit fortlaufendem Trennfortschritt immer geringer, da der Eingriffswinkel bedingt durch die fixen Umlenkrollen immer mehr abflacht. Sein Maximum erreicht er nur zu Beginn des Schnittes.

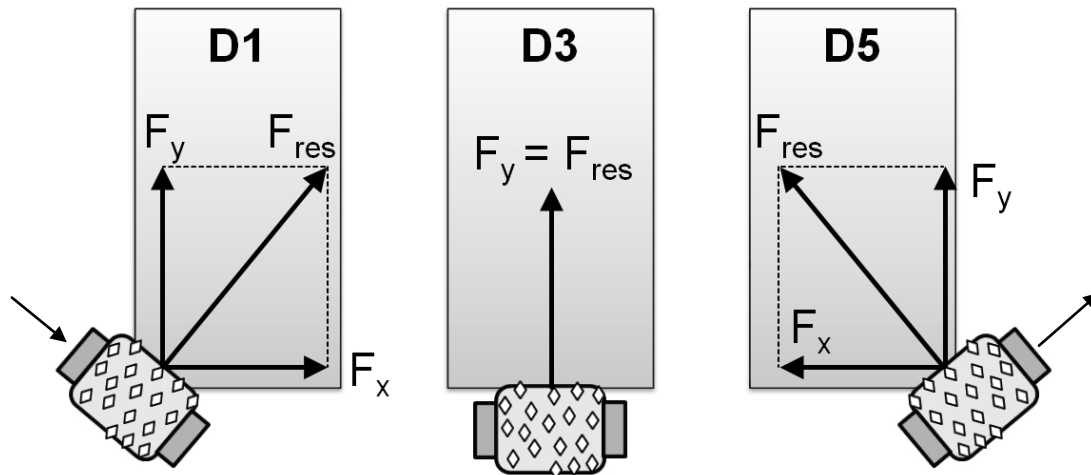


Abbildung 93: Eingriffssituation durch die Seilspannung

Ausgehend von einem symmetrischen Schnittbild ist auf der „Austrittsseite“ an Block D5 die Eingriffssituation genau y-Achsen gespiegelt zu Block D1. Die Kraft F_x des Diamantsegments auf Block D1 erreicht die gleiche Größe wie die Kraft F_x auf Block D5, jedoch mit umgekehrtem Vorzeichen.

Bei dem mittleren Block D3 entfällt die Kraftkomponente in x-Richtung, da das Diamantsegment waagrecht an dem Block anliegt. Lediglich an den Kanten von Block D3 ist mit einem minimalen Winkel zu rechnen, jedoch gleichen sich die Kraftkomponenten in x-Richtung durch die Symmetrie wieder aus. Das erklärt, warum in Abbildung 91 der Block D3 die höchste Kräfteinwirkung erfährt.

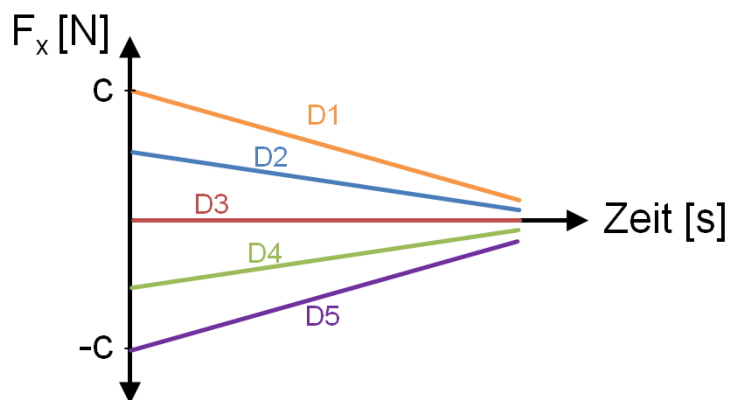


Abbildung 94: Qualitativ anzunehmender Kraftverlauf der Blöcke in x-Richtung

Da die Kraft in x-Richtung nicht gemessen wurde, kann keine genaue Aussage über deren Kraftverlauf getroffen werden. Jedoch sind Abschätzungen möglich, wie sich der Kraftverlauf von F_x für die fünf Blöcke verhalten könnte. Abbildung 94 zeigt einen solch möglichen Verlauf unter der Voraussetzung eines symmetrischen Schnittbildes.

Die beiden äußeren Blöcke D1 und D5 erfahren durch den Eingriffswinkel die größte Kraft, jedoch mit unterschiedlichen Vorzeichen. Die Kraft bei den Blöcken D2 und D4 ist bereits deutlich vermindert und aufgrund der Symmetrie des Schnittbildes sind auch hier die Vorzeichen unterschiedlich. Block D3 erfährt über die komplette Trennzeite keine Kraft aus der x-Richtung. Aufgrund des immer flacher werdenden Eingriffswinkels vermindert sich der

Betrag der Kraft für alle Blöcke (bis auf D3) mit fortschreitender Trennzeit. Um den tatsächlichen Kraftverlauf zu erhalten, der an unterschiedlichen Stellen zu unterschiedlichen Zeiten auf das Werkstück wirkt, müsste die Kombination aus beiden Krafrichtungen berücksichtigt werden.

Durch die Untersuchung mit einer partiellen Werkstückunterteilung wurde gezeigt, wie sich der zeitliche Kraftverlauf in einem Werkstück ausprägt. Insbesondere zu Beginn des Schnittes sind die Kraftspitzen an den Kanten deutlich zu erkennen. Aufgrund dessen ist es ratsam, die Kanten an Werkstücken vor Einsatz einer Seilsäge zu entfernen.

5.2 Versuche mit Tauchseilsäge

In allen bisherigen Versuchen kam das Prinzip des umschlingenden Verfahrens zur Anwendung. Das umschlingende Verfahren besitzt jedoch den großen Nachteil, dass sich die Einflussparameter stetig ändern und sich diese nicht vollständig isolieren lassen. Als größtes Hindernis wird der nicht konstant bleibende Eingriffswinkel angesehen. Der Eingriffswinkel ist immer zeitabhängig. Dieser Nachteil kann ausgeglichen werden, wenn auch das Verfahren geändert wird. Durch den Einsatz des Tiefenschnittverfahrens ist es möglich, den Eingriffswinkel konstant zu halten (siehe Abschnitt 2.6.2 Tiefenschnittverfahren).

Beim Verfahren Tiefenschnitt sind, anders als beim umschlingenden Verfahren, bei dem das Diamantseil komplett um das Werkstück gelegt werden muss, nur bedingte Zugangsmöglichkeiten zu dem zu trennenden Werkstück notwendig. Vorteil dieses Verfahrens ist die Möglichkeit, bei nur einer frei zugänglichen Oberfläche in die Tiefe zu schneiden, beziehungsweise in das Werkstück „einzutauchen“. Während des Trennprozesses wird sich ab einem bestimmten Punkt aufgrund der Anordnung der Eingriffswinkel nicht mehr ändern. Wenn zusätzlich die zu trennende Fläche gering gehalten wird, ist es möglich, spezifische Abtragsleistungen zu ermitteln, um einen von der Geometrie unabhängigen zentralen Kennwert zu erhalten.



Abbildung 95: Zur Tauchseilsäge umgerüsteter Versuchsstand

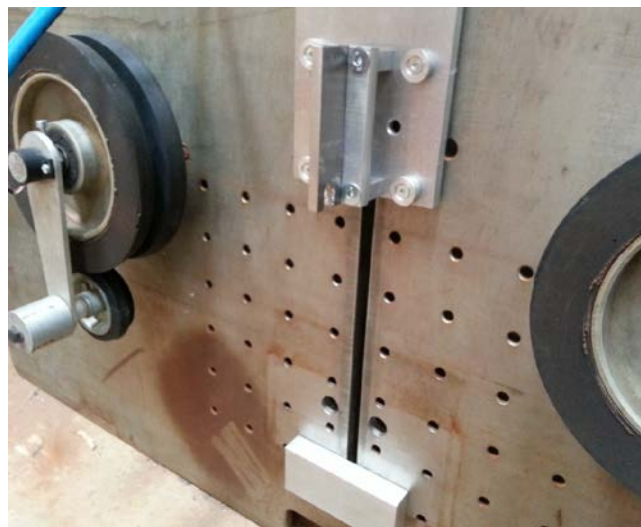


Abbildung 96: Detailbetrachtung der Probenaufnahme

Aufgrund dieses Vorhabens wurde der Versuchstand zu einer Tauchseilsäge umkonstruiert. Um diese spezifischen Abtragsleistungen zu ermitteln, wurde eine Probe in das gespannte

Diamantseil gedrückt. Die Dicke dieser Probe besitzt jedoch nur die Größe eines Diamantsegmentes besitzen, damit die Werte unabhängig von der Geometrie bleiben. Nach einer gewissen Einlaufzeit stellt sich ein konstanter Winkel ein und es können aussagekräftige Werte aufgenommen werden, die rückgeführt werden können auf die gesamte Trennfläche unterschiedlicher Werkstücke. In Abbildung 95 und Abbildung 96 ist der neue Versuchsaufbau dargestellt.

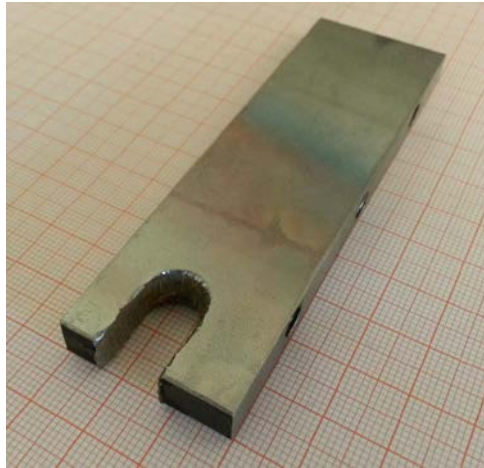


Abbildung 97: Angesägte Werkstückprobe

Als Werkstückprobe wurde eine Platte mit den Abmessungen von 100 mm x 30 mm x 7 mm angefertigt. Die 7 mm entsprechen der Länge eines Diamantsegmentes. Abbildung 97 zeigt die unvollständig getrennte Probe. Der Versuch wurde gestartet, jedoch stellte sich heraus, dass dieser nicht bis zum Ende durchgeführt werden konnte. Folgende Problempunkte waren hierfür verantwortlich.

Problematisch ist zum einen die Kombination von Seilspannung und Seilgeschwindigkeit. Die Seilspannung wird in der Tauchseilsägeanordnung durch den Pneumatikzylinder bei Kontakt von Werkzeug und Werkstück aufgebracht. Jedoch muss das Diamantseil auf die gewünschte Geschwindigkeit beschleunigt werden, was jedoch in der Startphase ohne Seilspannung nur sehr schwer zu bewerkstelligen ist. So zeigt sich, dass das Diamantseil ohne Seilspannung sehr schnell aus der eigentlich durch die Umlenkrollen vorgegebenen Bahn verläuft und großer Schlupf zwischen Antriebsrollen und Diamantseil entsteht.

Zum anderen kommt es, falls die Startprobleme überwunden werden konnten, innerhalb von wenigen Sekunden zu einer Verklemmung der Diamantsegmente mit dem Werkstück. Der Pneumatikzylinder drückt das Werkstück permanent gegen das Diamantseil und somit auch in die Bereiche zwischen den Diamantsegmenten. Da dieser Durchmesser kleiner ist, kommt es, sobald wieder ein Diamantsegment auf die Werkstückprobe trifft, zu einer Verklemmung und damit zu einem Blockieren und abrupten Stillstand des Diamantseils. Ein kontinuierlicher Trennprozess ist dadurch nicht zu bewerkstelligen.

Diese Probleme könnten durch Aufbringen einer separater Seilspannung umgangen werden, was das Anfahren auf die gewünschte Geschwindigkeit ermöglichen würde. Sobald der Trennprozess stabil abläuft, könnte diese separate Seilspannung wieder abgenommen werden. Weiterhin müsste die Dicke der Probe mindestens der Gesamtlänge von zwei Diamantsegmenten inklusive deren Abstand entsprechen. Dadurch wäre gewährleistet, dass sich mindestens immer ein Diamantsegment im Eingriff befindet und so eine Verklemmung

unwahrscheinlicher wird. Dies hätte allerdings zur Folge, dass dadurch die Unabhängigkeit von der Geometrie nicht mehr vollständig gewährleistet wäre.

Weiterführende Untersuchungen in diesem Bereich wären für das Verständnis der Einflussparameter sicherlich hilfreich und könnten in einer weiterführenden Arbeit untersucht werden.

5.3 Krafterhöhung auf der Austrittsseite

Wie bereits in Abschnitt 3.2.2.1.1 beschrieben, wurden die auftretenden Kräfte, die bei der Bearbeitung der Werkstücke durch die Seilsäge entstehen, mit Scherkraftaufnehmer aufgenommen.

In Abbildung 56 auf Seite 49 ist dargestellt, wie die Scherkraftaufnehmer an den Umlenkrollen befestigt sind, so dass sich das Diamantseil genau um 180° gedreht im Eingriff befindet. Somit kann näherungsweise die Kraft aufgenommen werden, die jeweils durch das Diamantseil an dem Werkstück anliegt. Da sich die Kraft auf der Werkstückeingangsseite stark von der Werkstückausgangsseite unterscheidet, müssen beide Seiten durch Scherkraftaufnehmer abgedeckt werden. Die Werkstückeingangsseite ist die Stelle, an der das Diamantseil auf das Werkstück trifft und die Werkstückausgangsseite die Stelle, an der das Diamantseil das Werkstück wieder verlässt. Bedingt durch den Vorschubdruck herrscht am Diamantseil lokal zwischen dem Werkstück und dem Antriebspunkt die höchste Spannung, die durch den Einsatz von Scherkraftaufnehmern, an denen die Umlenkrollen befestigt sind, sichtbar gemacht werden können.

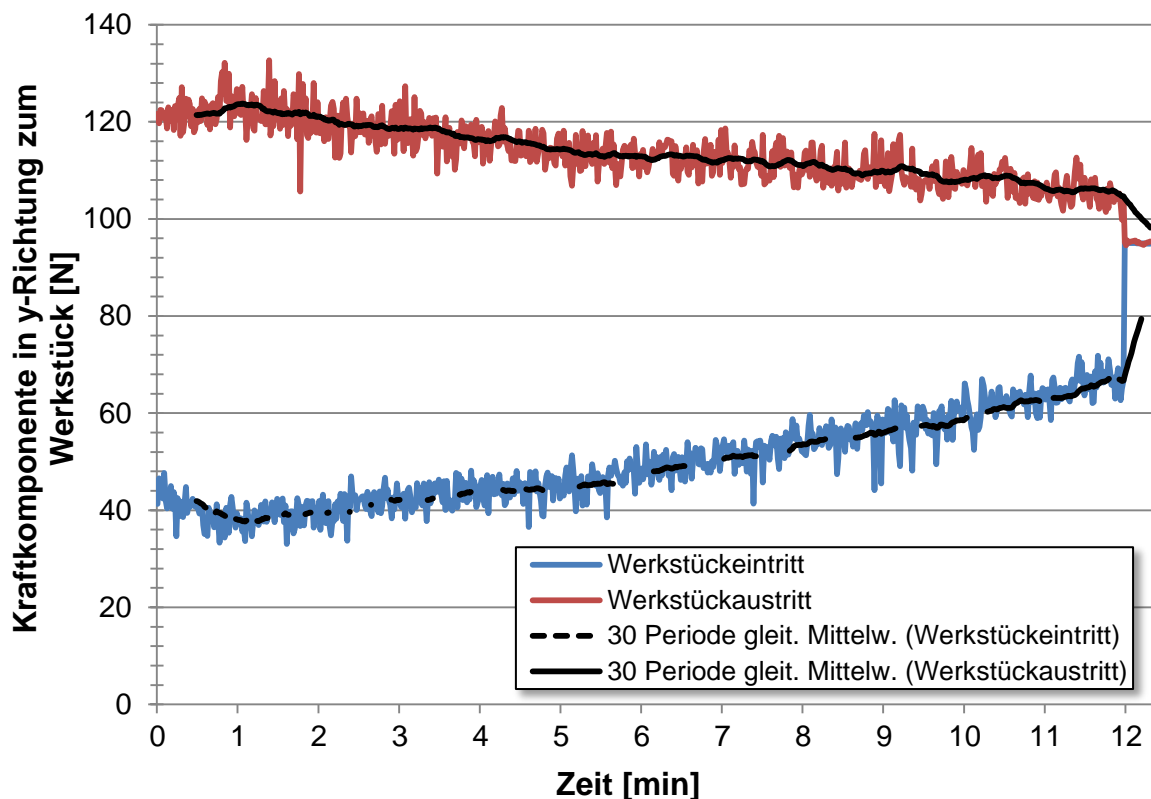


Abbildung 98: Kraftverlauf des Diamantseils durch das Werkstück für die Ein- und Austrittsseite

In Abbildung 98 sind die Kraftverläufe am Eintritts- und am Austrittspunkt, erzeugt durch den Kontakt zwischen Diamantseil und Werkstück, dargestellt. Aufgrund des immer wiederkehrenden Musters, wurden die Daten hierfür der Versuchsreihe R2 aus dem Versuch W6 repräsentativ entnommen. In diesem Versuch wurde ein rundes Werkstück aus Stahl getrennt. Die Austrittsseite sinkt leicht von Beginn mit 120 N auf 105 N gegen Ende ab. Die Kraft auf der Eintrittsseite beträgt zu Beginn mit ca. 40 N nur ein Drittel der Kraft auf der Austrittsseite. Aufgrund des Bogens, der sich im Laufe der Zeit durch den Trennprozess im umschlingenden Verfahren auf natürliche Weise einstellt und den geringer werdenden Eingriffswinkel, steigert sich die Kraft auf der Austrittsseite auf bis zu 70 N.

Nach dem Durchtrennen der Probe gleichen sich die beiden Werte wieder an den „Ruhezustand“ an, der bei 95 N liegt. Dieser ist gekennzeichnet durch das alleinige Aufbringen des Vorschubdrucks, ohne Schnittgeschwindigkeit. Daraus lässt sich schließen, dass sich die Kraft gegenüber dem Ruhezustand auf der Austrittsseite während des Prozesses noch einmal erhöht hat, während sich die Kraft auf der Eintrittsseite stark verringert hat.

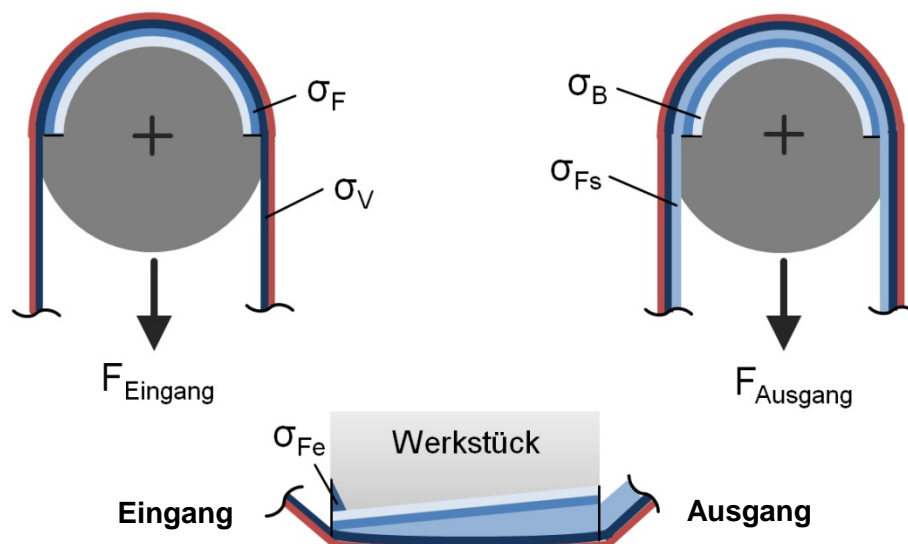


Abbildung 99: Darstellung der Seilspannungen für Ein- und Austrittsseite des Werkstücks zu Beginn des Schnitts nach Panhorst [1] vgl. Abbildung 34

Abbildung 99 zeigt die Seilspannungen für die Ein- und Austrittsseite des Werkstücks, wie sie nach Panhorst [1] anzunehmen sind. Der Unterschied zwischen beiden Seiten zu Ein- und Ausgang besteht nur in der Spannung σ_{FS} , also die Spannung die durch die Schnittkräfte hervorgerufen wird. Da die Werte für die Ausgangsseite zwischen Werkstück und Antriebsrad gemessen wurden, liegt auf der Ausgangsseite die gesamte Spannung σ_{FS} an. Wie Abbildung 98 zu entnehmen ist, sinkt jedoch die Kraft am Eingang, hervorgerufen durch die anliegenden Spannungen, gegenüber dem Ruhezustand ab. Daraus ist zu schlussfolgern, dass sich die Vorspannung σ_V , ebenfalls dynamisch entlang der Seillänge verändert und sie während der Schnittbewegung im Eingriff mit dem Werkstück nicht über die gesamte Länge als konstant angenommen werden kann. In diesem Fall nimmt die Vorspannung auf der Eingangsseite ab. Schneidet man das Werkstück frei, so ergeben sich folgende Kräfte:

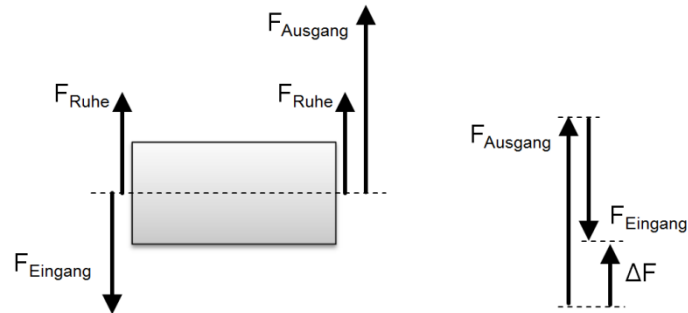


Abbildung 100: Schematische Darstellung der Kräfte

Die Differenz gegenüber dem Ruhezustand wird nach folgender Formel aufgestellt:

$$(F_{Austritt}(t) - F_{Ruhe}) + (F_{Eintritt}(t) - F_{Ruhe}) = \Delta F(t) \quad (10)$$

Daraus folgt:

$$(F_{Austritt}(t) + F_{Eintritt}(t)) - 2 \cdot F_{Ruhe} = \Delta F(t) \quad (11)$$

Nach Abbildung 98 ergibt sich für den Anfangszeitpunkt $t_{\text{Anfang}} = 0 \text{ min}$ in (11) eingesetzt:

$$(120 \text{ N} + 40 \text{ N}) - 2 \cdot 95 \text{ N} = -30 \text{ N}$$

$$\underline{\Delta F(0 \text{ min}) = -30 \text{ N}}$$

Für den Endzeitpunkt $t_{\text{Ende}} = 12 \text{ min}$ in (11) eingesetzt, ergibt sich:

$$(105 \text{ N} + 70 \text{ N}) - 2 \cdot 95 \text{ N} = -15 \text{ N}$$

$$\underline{\Delta F(12 \text{ min}) = -15 \text{ N}}$$

Aus diesen Berechnungen folgt, dass das Diamantseil am Anfang des Sägeprozesses an das Werkstück, in diesem Falle mit dem Mittelwert von Ein- und Austritt in Höhe von 30 N, angedrückt wird. Gegen Ende des Trennprozesses nimmt der Mittelwert ab und erreicht nur noch eine Anpresskraft von 15 N. Die aufgezeichneten Daten zeigen, dass die Kraft, die vom Werkzeug auf das Werkstück ausgeübt wird, nicht konstant ist. Auf der Seite des Werkstückaustritts erhöht sich die Kraft über den eingestellten Wert und auf der Werkstückeintrittsseite verringert sie sich um ein Vielfaches. Bei den geringen Abmessungen der Werkstücke in den in dieser Arbeit durchgeführten Versuchsreihen wirkt sich dieser Effekt kaum auf den Trennprozess aus, woraus sich ein symmetrischer Abtrag folgern lässt. Beachtet werden muss jedoch, dass sobald größere Strukturen getrennt werden sollen, sich der Effekt in einem unsymmetrischen Schnittbild widerspiegeln wird.

5.4 Zeitlicher Eingriffswinkelverlauf

Anhand des genauen Verlaufs des Eingriffswinkels lässt sich der Trennfortschritt bei unterschiedlichen Geometrien bestimmen. Es gestaltet sich als sehr schwierig, den genauen Eingriffswinkel während des Trennprozesses aufzunehmen, da die Sicht sehr eingeschränkt ist. Das Werkstück liegt bis zur Oberkante im Wasser, das während des Trennprozesses innerhalb weniger Sekunden durch die angefallenen Späne so stark verschmutzt, dass das Werkstück nicht mehr sichtbar ist. Hierzu addieren sich noch die Verwirbelungen im Wasserbecken, hervorgerufen durch die Diamantseilgeschwindigkeit.



Abbildung 101: Aufbau für den Drehwinkelsensor

Eine Möglichkeit den Winkelverlauf aufzunehmen besteht darin, dass der Trennprozess in bestimmten Intervallen unterbrochen wird und der Winkel manuell gemessen werden kann. Bei dieser Methode zeigt der Eingriffswinkel keinen kontinuierlichen Verlauf. Des Weiteren wird das Messergebnis verfälscht, da bei jedem Beschleunigen beziehungsweise Abbremsen des Diamantseils ein Abtrag am Werkstück vollzogen wird.

Es wurde daher beschlossen, einen Drehwinkelsensor an der letzten Umlenkrolle vor Werkstückeintritt, außerhalb des Wassers, anzubringen. Die Umsetzung zur Integration des Drehwinkelsensors in die Versuchseinrichtung ist in Abbildung 101 dargestellt. Die Welle des Drehwinkelsensors ist starr verbunden mit der Aufhängung der Umlenkrolle. Das Gehäuse ist auf einem beweglichen Hebel angebracht, an dessen anderem Ende eine kleine Umlenkrolle drehbar gelagert ist. Diese kleinere, mit Gummi beschichtete Umlenkrolle läuft auf dem Diamantseil. Die Schwerkraft sorgt dafür, dass die Umlenkrolle immer am Diamantseil anliegt, es jedoch nicht zu stark belastet. Die Winkeländerung, die das Diamantseil erfährt, wird so direkt an den Drehwinkelsensor weitergeleitet.

In Abbildung 102 ist der aufgenommene Winkelverlauf für ein rechteckiges, quer liegendes und ein rundes Werkstück über der Trennzeit aufgetragen. Zu erwarten wäre gewesen, dass bei rechteckigen, quer liegenden Werkstücken die Eckbereiche mit den Kanten schneller getrennt werden und somit der Eingriffswinkel schnell ansteigt. Jedoch zeigt der Verlauf zu Beginn keinen erhöhten Anstieg, was darauf schließen lässt, dass die Kanten für den Trennfortschritt nicht von Belang sind. In dem Diagramm wurde der Winkelverlauf für das

rechteckige, quer liegende Werkstück durch eine quadratische Funktion approximiert, da der Eingriffswinkel im zeitlichen Verlauf minimal ansteigt. Gerade gegen Ende des Trennprozesses, wenn die oberen Kanten überwunden sind und der Schnitt sich zur Mitte des Werkstücks bewegt, kommt es zu einem kleineren Anstieg des Eingriffswinkels. Näherungsweise kann von einem fast linearen Anstieg ausgegangen werden.

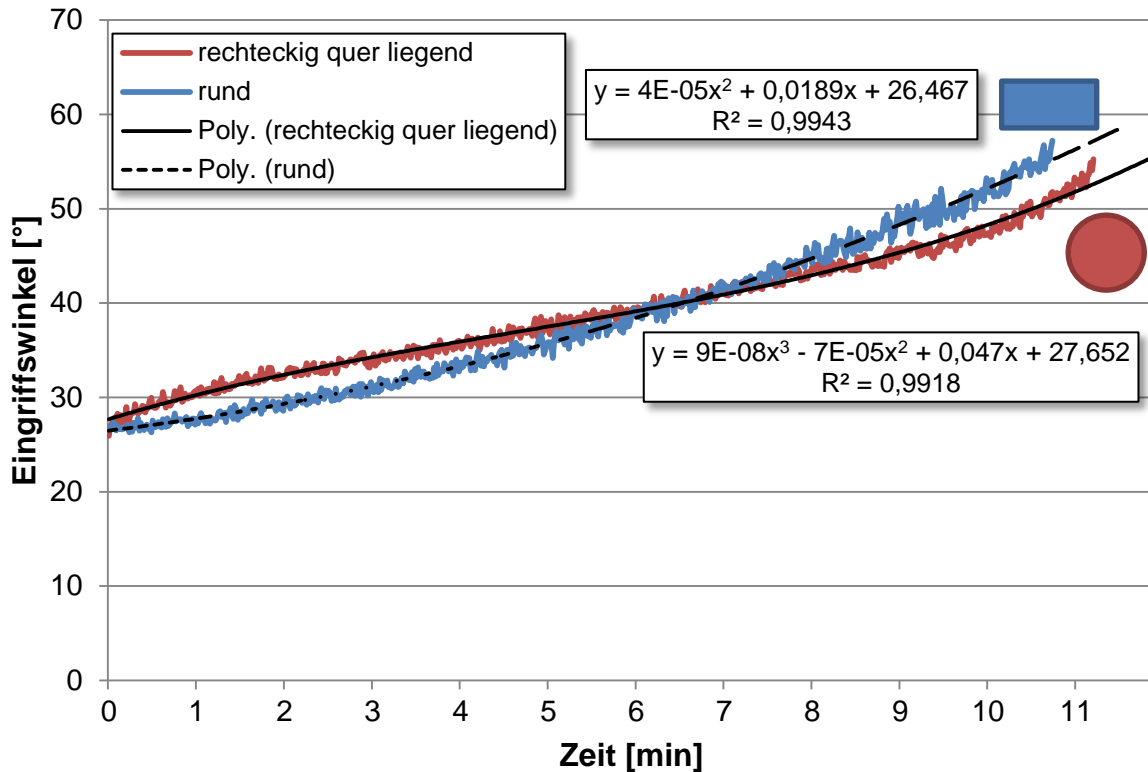


Abbildung 102: Zeitlicher Eingriffswinkelverlauf

In Abbildung 103 sind die verschiedenen Phasen dargestellt, die das Diamantseil bei einem Schnitt durch ein rechteckiges, quer liegendes Werkstück durchläuft. Es kann anhand dieser Daten nicht exakt bestimmt werden, wann genau das Diamantseil von der ersten in die zweite Phase wechselt und sich damit mit dem Werkstück in voller Länge im Eingriff befindet. Ebenso können über den Zeitpunkt, wann der Wechsel von der zweiten in die dritte Phase erfolgt, nur Vermutungen getroffen werden. Der genaue Zeitpunkt der einzelnen Phasenwechsel bleibt durch diese Methode weiterhin unbekannt.

Bei dem runden Werkstück zeigt sich der Unterschied des Verlaufs zu Anfang und Ende des Trennprozesses deutlicher. Zu Beginn erfährt der Eingriffswinkel einen flachen Anstieg, gefolgt von einem nahezu linearen Anstieg in der Mitte des Trennprozesses bis gegen Ende der Winkel wieder stärker ansteigt. Die Kurve kann gut mit einem Polynom dritten Grades beschrieben werden. Im Vergleich beider Verläufe ist also ein nur minimaler Unterschied zwischen rechteckigen, quer liegenden und runden Werkstücken zu beobachten.

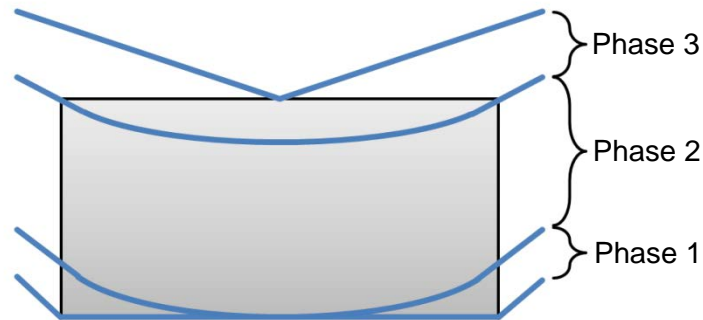


Abbildung 103: Phasen beim Trennen eines rechteckigen, quer liegenden Werkstücks

Es hat sich gezeigt, dass der Winkelverlauf bei rechteckigen, quer liegenden Werkstücken keine exakten Rückschlüsse auf die Trennzeit von Kanten zulässt. Der Winkelverlauf erweist sich als sehr stetig und besitzt keine signifikanten Stellen, die darauf hinweisen könnten, dass eine Kante überwunden wurde und sich das Diamantseil im vollen Eingriff befindet. Die Winkeländerung erlaubt also keine Aussage über die Eingriffslänge des Diamantseils. Bei dem runden Werkstück ist nur ein leichter Anstieg am Anfang und am Ende zu erkennen. Zumindest in dieser Anordnung und mit den eher kleineren Abmessungen der Werkstücke ist davon auszugehen, dass sich der Eingriffswinkel linear zur Trennzeit verhält.

5.5 Ermittlung der Eingriffslänge

Die Eingriffslänge des Werkzeugs im Werkstück stellt eine wichtige Größe im Trennprozess dar. In den Versuchen wurden verschiedene Werkstücke getrennt, um den zeitlichen Verlauf der sich einstellenden Eingriffslänge zu messen. Da jede Geometrie ein unterschiedliches Schnittbild aufweist und sich das einstellende Schnittbild theoretisch nur sehr schwer bestimmen lässt, wurde an einem rechteckigen, quer liegend geschnittenen Werkstück das Schnittbild optisch erfasst. Durch die Erfassung des Schnittbilds kann anhand einer Parabelschar die Eingriffslänge bei unterschiedlichen Eingriffswinkeln vorhergesagt werden. Anhand der Eingriffslänge kann auch die bereits geschnittene Fläche berechnet werden.

Als Startpunkt P (100/0) wurde die untere rechte Ecke des Werkstücks gewählt, da an dieser Stelle auch der erste Materialabtrag erfolgt. An diesem Punkt wurde ein Laufparameter d definiert, der in y -Richtung läuft. Pro Millimeter steigt er um den Wert 1 an, sodass er mit dem Wert 100 den oberen rechten Eckpunkt des Werkstücks erreicht. Zur Vermessung wurde ab dem Startpunkt $d = 0$ alle 10 mm in y -Richtung jeweils eine Riefe untersucht. Vereinfachend wurde davon ausgegangen, dass sich das Schnittbild symmetrisch verhält. Die vermessenen Punkte sind in Anhang B dargestellt. Anhand der erfassten Punkte wurde für jede Riefenspur eine Gleichung aufgestellt, die diese am besten abbildet.

Anhand der aufgestellten Gleichungen wurde eine Parabelschar ermittelt, die diese Gleichungen annähernd abbildet. Abbildung 104 zeigt die Parabelschar über einem rechteckigen, quer liegenden Werkstück mit folgender Form:

$$f(x) = (4,6 \cdot 10^{-3} - 1,84 \cdot 10^{-5} \cdot d) \cdot x^2 + 1,203 \cdot d - 47 \quad (12)$$

Die Parabelschar ermöglicht es für jedes d , die dazugehörige Gleichung zu ermitteln. Aus den Geometriegrenzen lassen sich die Grenzwerte für die Gleichung bestimmen. Anhand der Längenberechnung für diese Gleichung ergibt sich innerhalb der Grenzwerte die Eingriffslänge.

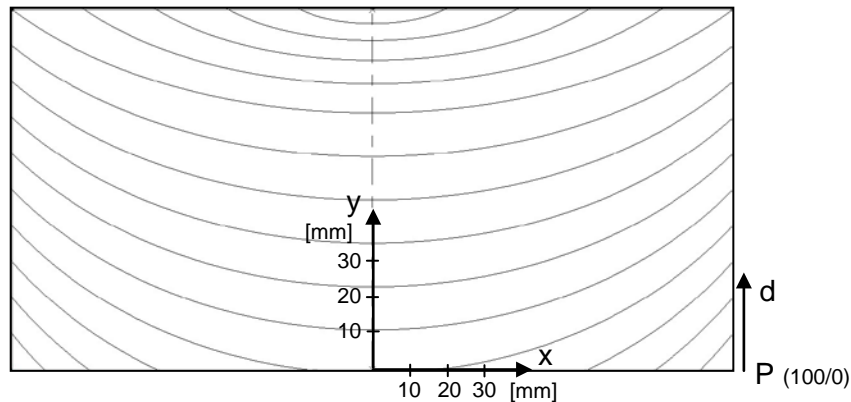


Abbildung 104: Ermittelte Schnittriefen für ein rechteckiges, quer liegendes Werkstück

Abbildung 105 zeigt die ermittelte Eingriffslänge für runde, rechteckige, quer liegende sowie rechteckige, hochkant stehende Werkstücke. Die Gleichung (12) wurde hierzu auch auf runde und hochkant stehende Werkstücke angewandt, da die Schnittriefen dieser Geometrien nur geringfügig von denen der rechteckigen, quer liegenden Werkstücke abweichen. Bei den rechteckigen, quer liegenden Werkstücken lässt sich der Verlauf eindeutig anhand der Geometrie erklären. Im Bereich von 0 bis ca. 40 mm befindet sich das Diamantseil nur mit der Kante auf beiden Seiten des Werkstücks im Eingriff. Es kommt zu einem schnellen Anstieg der Eingriffslänge. Erst ab ca. 40 bis 100 mm befindet sich das Werkzeug im Volleingriff. In diesem Bereich verringert sich die Eingriffslänge mit fortschreitendem Laufparameter d , da der Eingriffswinkel immer flacher wird. Sobald mit dem Wert 100 mm die obere Ecke erreicht wurde, läuft das Diamantseil in Richtung Mitte des Werkstücks. In diesem Bereich kommt es zu dem umgekehrten Effekt, der zu Beginn des Schnittes wirkte; jetzt findet eine Verkleinerung der Eingriffslänge statt. Die Bogenlänge fällt rapide ab, bis sie schließlich den y -Wert 0 mm anzeigt; der Schnitt wurde vollständig durchgeführt.

Bei den runden Werkstücken ist der Verlauf ohne erkennbare Spitzen. Es kommt im Verlauf der Eingriffslänge zu keiner klar erkennbaren Bereichsbildung. Die ermittelte Parabelschar ist nur bedingt auf runde Werkstücke anzuwenden, da sich die Riefen aufgrund der geänderten Geometrie leicht unterschiedlich ausprägen können. Als erste Näherung ist diese jedoch als ausreichend zu betrachten. Der Maximalwert für die Eingriffslänge bei runden Werkstücken ist 168 mm; also nur knapp oberhalb des Durchmessers von 160 mm.

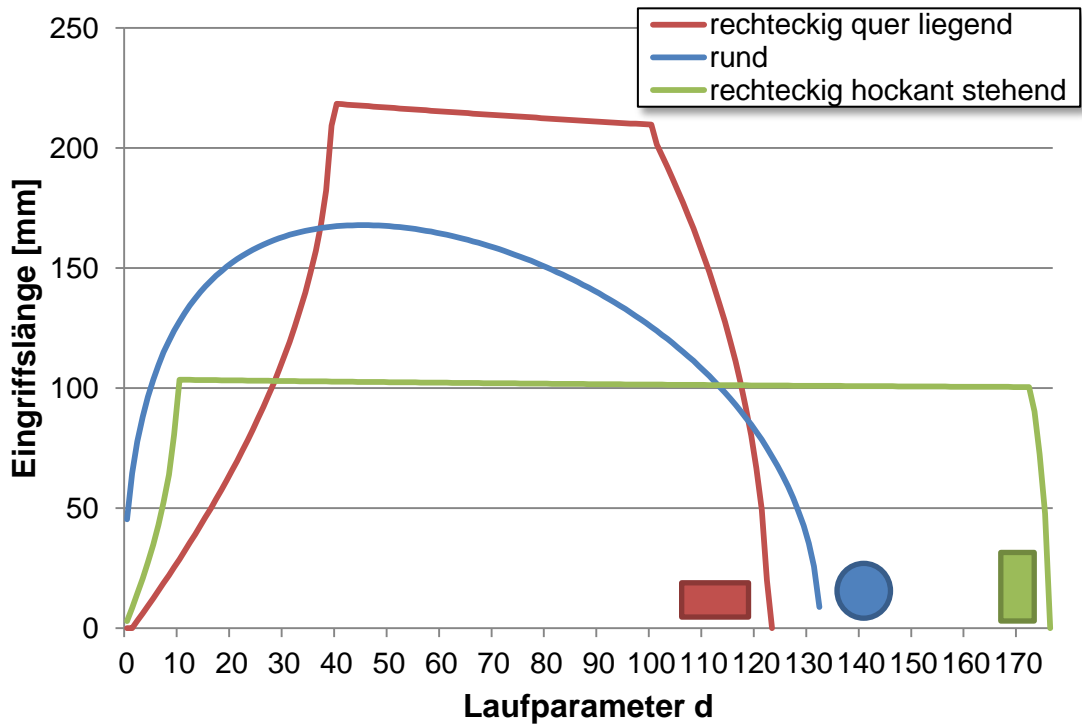


Abbildung 105: Ermittelte Eingriffslänge für verschiedene Geometrien

Die rechteckige, hockant stehende Geometrie verhält sich ähnlich zu der rechteckigen, quer liegenden, besitzt jedoch im Bereich des Volleingriffs nur ungefähr die Hälfte der Eingriffslänge. Durch die hockant stehende Geometrie ist jedoch die Ausdehnung in y-Richtung größer.

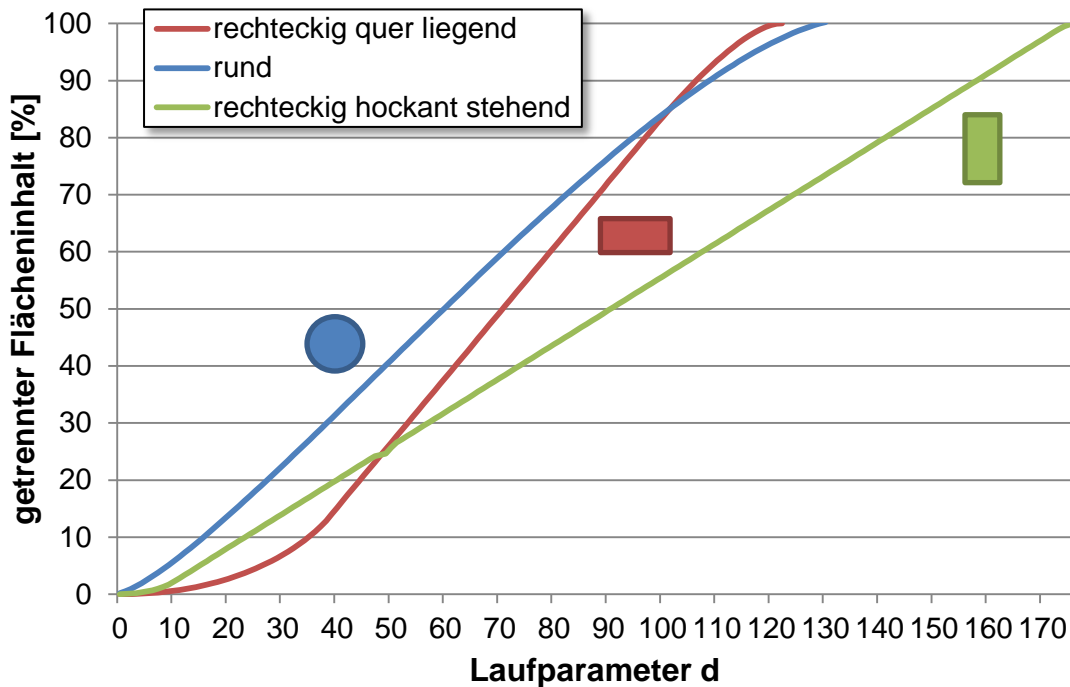


Abbildung 106: Entwicklung des getrennten Flächeninhalts für verschiedene Geometrien

Aus diesen ermittelten Eingriffslängen kann der Verlauf des bereits getrennten Flächeninhaltes für jeden Laufparameter d errechnet werden. Abbildung 106 zeigt diesen Verlauf. Der Verlauf für die runden Werkstücke weist zu Beginn die größte Steigerung auf und erreicht dadurch den stärksten Zuwachs an getrennter Fläche. Der Verlauf für das rechteckige, quer liegende Werkstück verzeichnet zu Beginn aufgrund des Kanteneinflusses einen langsameren Anstieg, sobald dieser jedoch überwunden wurde, erreicht der Verlauf die größte Steigerung. Gegen Ende flacht er wieder leicht ab, da das Diamantseil die obere Kante überwunden hat und nur noch das verbleibende Material aus der Mitte des Werkstücks trennt. Bei dem rechteckigen, hochkant stehenden Werkstück ist die Auswirkung der Kante nur sehr gering, was zu einem konstanten Anstieg in der getrennten Fläche führt. Die in diesem Stadium noch zu trennende Fläche ist geringer, da dieses Werkstück, im Gegensatz zu dem rechteckigen, quer liegenden Werkstück, nur halb so breit ist.

Die ermittelten Werte sind zeitunabhängig. Wie bereits in Abschnitt 5.4 gezeigt wurde, ist der zeitliche Verlauf des Eingriffswinkels als relativ konstant zu betrachten. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass die zeitabhängige Eingriffslänge ebenfalls nahezu diese Form annehmen wird.

5.6 Nutzen der zusätzlichen Versuche

Aus den Untersuchungen mit einer partiellen Werkstückunterteilung wurde gezeigt, wie sich der zeitliche Kraftverlauf in einem Werkstück ausprägt. Insbesondere zu Beginn des Schnittes sind die Kraftspitzen an den Kanten deutlich zu erkennen. Aufgrund dessen ist es ratsam, die Kanten an Werkstücken vor Einsatz einer Seilsäge zu entfernen.

Die Versuche mit der Tauchseilsäge haben gezeigt, dass weiterführende Untersuchungen in diesem Bereich für das Verständnis der Einflussparameter hilfreich wären, was in einer weiterführenden Arbeit untersucht werden könnte.

Es wurde nachgewiesen, dass die Kraft, die während einem Schnitt vom Werkzeug auf das Werkstück ausgeübt wird, nicht konstant ist. Auf der Seite des Werkstückaustritts erhöht sich die Kraft über den eingestellten Wert und auf der Werkstückeintrittsseite verringert sie sich um ein Vielfaches. Bei den geringen Abmessungen der Werkstücke in den in dieser Arbeit durchgeführten Versuchsreihen wirkt sich dieser Effekt kaum auf den Trennprozess aus, woraus sich ein symmetrischer Abtrag folgern lässt.

Die Versuche mit dem zeitlichen Verlauf des Eingriffswinkels haben gezeigt, dass der Winkelverlauf bei rechteckigen, quer liegenden Werkstücken keine exakten Rückschlüsse auf die Trennzeit von Kanten zulässt. Der Winkelverlauf erweist sich als sehr stetig und besitzt keine signifikanten Stellen, die darauf hinweisen könnten, dass eine Kante überwunden wurde und sich das Diamantseil im vollen Eingriff befindet. Die Winkeländerung erlaubt also keine Aussage über die Eingriffslänge des Diamantseils. Zumindest in dieser Anordnung und mit den eher kleineren Abmessungen der Werkstücke ist davon auszugehen, dass sich der Eingriffswinkel linear zur Trennzeit verhält.

Die theoretischen Berechnungen erlauben es annäherungsweise die verschiedenen Eingriffslängen bei verschiedenen Geometrien zu berechnen. Damit wird es möglich den Verlauf des bereits getrennten Flächeninhaltes für jeden Laufparameter d bei unterschiedlicher Geometrie zu errechnen.

6 Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuchsreihen aus Abschnitt 4 analysiert, um den Einfluss der Prozessparameter genau beschreiben und in ein neues Modell übertragen zu können.

6.1 Vergleich der Schnittleistungen

Zuerst werden die in den jeweiligen Versuchsreihen erzeugten Schnittleistungen betrachtet. Zur besseren Übersicht über die Versuchsreihen ist es hilfreich, wenn erneut Tabelle 9: Auflistung des kompletten Versuchsprogramms“ von Seite 60 herangezogen wird.

Abbildung 107 zeigt den Vergleich der Schnittleistungen für alle durchgeführten Versuchsreihen. Die Gesamtleistung gibt an, wie viel Fläche pro Zeit in einer Versuchsreihe getrennt worden ist. Sie stellt somit den Durchschnitt über alle Versuche einer Reihe dar. Um die Gesamtleistung genauer einzuordnen, beziehungsweise um sie besser zu deuten, wurde zusätzlich die Leistung für den ersten und für den letzten Versuch in der jeweiligen Versuchsreihe mit angegeben.

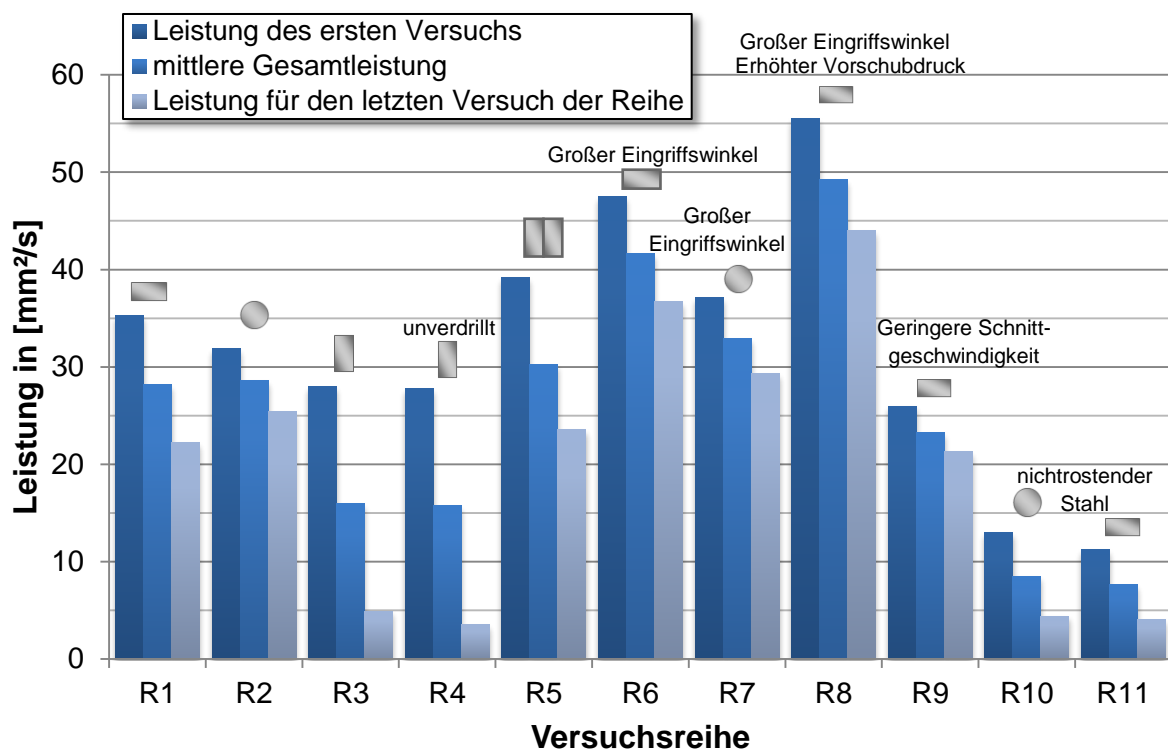


Abbildung 107: Vergleich der Schnittleistungen für alle Versuchsreihen

Die niedrigsten Schnittleistungen erzielten die Versuchsreihen R10 und R11 mit jeweils nur 7,03 mm²/s beziehungsweise 5,94 mm²/s. In diesen beiden Reihen wurde nichtrostender Stahl (1.4301) getrennt, was jedoch nur in zwei beziehungsweise drei Versuchen möglich war. Die Zwischenräume setzten sich mit Spänen von bereits getrenntem Stahl zu, was zur Folge hatte, dass die Diamanten nicht mehr frei standen ($h_{cu} = 0$) und somit kein Abtrag mehr zu erzielen war.

Höhere Schnittleistungen wurde in den Reihen R3 und R4 mit jeweils 11,87 mm²/s beziehungsweise 10,42 mm²/s erzielt. In den beiden Reihen wurden hochkant stehende Werkstücke getrennt, einmal verdrillt und einmal unverdrillt. Die Reihe mit dem unverdrillten Diamantseil schnitt nur minimal besser ab als die Reihe mit dem verdrillten Diamantseil.

Die Schnittleistungen aus den Versuchsreihen R1, R2, R5 und R9 lagen mit Werten von jeweils 26,84 mm²/s, 28,46 mm²/s, 29,60 mm²/s und 22,92 mm²/s relativ nahe beieinander. In den Versuchsreihen wurden quer liegende, runde und doppelt hochkant stehende Werkstücke getrennt sowie einmal quer liegende Werkstücke mit geringerer Schnittgeschwindigkeit.

Die drittbeste Schnittleistung wurde in der Versuchsreihe R7 mit einem Wert von 32,75 mm²/s erzielt. In dieser Versuchsreihe wurden runde Werkstücke mit größerem Eingriffswinkel getrennt. Darüber ordnet sich die Versuchsreihe R6 mit einem Wert von 41,31 mm²/s ein. In dieser wurden quer liegende Werkstücke ebenfalls mit größerem Eingriffswinkel getrennt.

Die mit Abstand beste Schnittleistung wurde in Versuchsreihe R8 mit einem Wert von 48,91 mm²/s erzielt. Geschnitten wurde eine quer liegende Probe unter einem erhöhten Vorschubdruck.

Aus diesen Werten ist zu schließen, dass sich ein vergrößerter Eingriffswinkel positiv auf die Schnittleistung auswirkt. Evident wird dies aus dem Vergleich von R6 und R8 mit R1. Auch der höhere Vorschubdruck erhöht die Leistung noch einmal, wie R6 im Vergleich mit R8 deutlich macht.

6.2 Verschleiß

Durch die Analyse der Differenzen in der Trennzeiterhöhung oder der Trennleistung, bezogen auf die Fläche, können Aussagen über den Diamantseilverschleiß gemacht werden. Die zeitlichen Leistungsdifferenzen zwischen den jeweiligen Versuchen bilden den Verschleiß, den das Werkzeug erfährt, ab da während der Versuche die übrigen Randbedingungen konstant gehalten wurden.

6.2.1 Mittlere Trennzeiterhöhungen

Als erster flächenunabhängiger Indikator für den Verschleiß kann die mittlere Trennzeiterhöhung zwischen den Versuchen innerhalb einer Versuchsreihe herangezogen werden. Es ist zu beachten, dass diese Werte keine Rückschlüsse auf die gesamte Trenndauer erlauben, sondern nur auf die jeweilige Trennzeitdifferenz. Dies erlaubt Aussagen über den Verschleiß, jedoch nicht über die Effizienz des Trennprozesses. Abbildung 108 zeigt diese mittlere Trennzeiterhöhung. Auf der Sekundärachse ist zusätzlich auch die prozentuale mittlere Trennzeiterhöhung dargestellt. Zur übersichtlicheren Darstellung wurden in der Abbildung die Versuchsreihen R10 (1496 s) und R11 (3196 s) ausgeblendet.

Die mit Abstand höchsten mittleren Trennzeiten besitzen die beiden Versuchsreihen R3 und R4, in der die hochkant stehenden Werkstücke getrennt worden sind. Mit einer mittleren Trennzeiterhöhung von 417,5 s (24,8 %) beziehungsweise 543,1 s (27,3 %) besitzen sie über fünfmal so hohe Werte wie die dritthöchste Trennzeitdifferenz, die mit 75,3 s (6,1 %) in der Versuchsreihe R5, in der doppelte Werkstücke getrennt wurden, erzielt wurde.

Mit einer mittleren Trennzeiterhöhung von 37 s (5,3 %) besitzt die Versuchsreihe R1 den vierthöchsten Wert. In dieser Versuchsreihe wurden rechteckige, quer liegende Werkstücke getrennt. Diese Werkstücke wurden auch in Versuchsreihe R9 getrennt, jedoch mit einer geringeren Schnittgeschwindigkeit, was eine Abnahme der mittleren Trennzeiterhöhung auf 20,9 s (3,0 %) zur Folge hatte. Die Reduktion der Schnittgeschwindigkeit verringerte demnach den Werkzeugverschleiß.

Runde Werkstücke, wie sie in den Versuchsreihen R2 und R7 getrennt wurden, haben der Trennzeit nach zu urteilen den geringsten Verschleiß. Die mittlere Trennzeiterhöhung beträgt 16,1 s (2,4 %) beziehungsweise 14,3 s (2,4 %). Die Versuchsreihe R7 unterscheidet sich von R2 nur darin, dass mit einem größeren Eingriffswinkel geschnitten wurde.

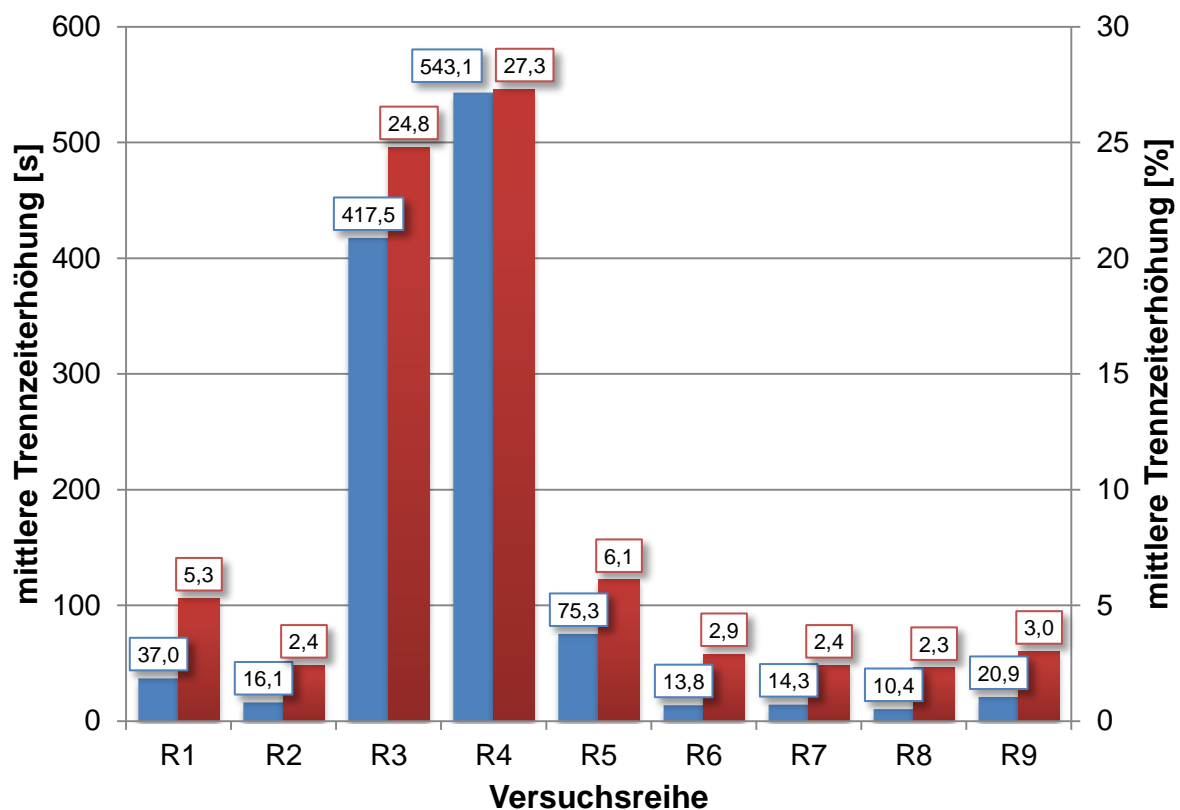


Abbildung 108: Mittlere Trennzeiterhöhung zwischen den Versuchen in einer Reihe

Die geringsten Werte für die mittlere Trennzeiterhöhung erzielten die Versuchsreihen R6 und R8 mit 13,8 s (2,9 %) beziehungsweise 10,4 s (2,3 %). Die Gemeinsamkeit der beiden Versuchsreihen lag darin, dass rechteckige, quer liegende Werkstücke unter einem größeren Eingriffswinkel geschnitten wurden. Der Unterschied bei Versuchsreihe R8 war jedoch der größere Vorschubdruck. Dieser Unterschied wirkte sich positiv auf die mittlere Trennzeiterhöhung aus, sodass der Wert mit 10,4 s (2,3 %) als Optimum im kompletten Versuchsprogramm ermittelt werden konnte.

6.2.2 Mittlere Abnahme der Trennleistung

Als zweiter Indikator für den aufgetretenen Verschleiß dient die, diesmal flächenabhängige, mittlere Abnahme der Trennleistung zwischen den einzelnen Versuchen. Der einzige Unterschied zu der mittleren Trennzeiterhöhung besteht darin, dass anhand der Leistung auch die getrennte Fläche mit berücksichtigt wird. Abbildung 109 zeigt diesen zweiten Indikator. Je größer die Abnahme ist, desto wahrscheinlicher ist das Ende der Lebensdauer

des Diamantseils erreicht worden. Die beiden Versuchsreihen R3 und R4, in denen hochkant stehende Werkstücke getrennt wurden, sind hier gute Beispiele, da bei beiden die Lebensdauer des Diamantseiles erreicht worden ist. Ebenfalls ist in Abbildung 109 zu erkennen, dass dies auch für die Versuchsreihen R10 und R11 zutrifft. Getrennt wurden hier Werkstücke aus nichtrostendem Stahl, wobei die Diamantseile zuletzt ebenfalls keine Schnittleistung mehr erzielten.

Auch hier gilt, wie auch schon bei der mittleren Trennzeiterhöhung, je niedriger die mittlere Abnahme der Trennleistung ausfällt, desto weniger Verschleiß erfuhr das Diamantseil durch den Trennprozess. Den geringsten Wert und somit das beste Verschleißverhalten zeigt die Versuchsreihe R9, in der quer liegende Werkstücke mit geringerer Schnittgeschwindigkeit getrennt wurden. Die Trennleistung erfuhr hier nur eine Abnahme von $0,58 \text{ mm}^2/\text{s}$. Der Verschleiß in der Versuchsreihe R2, in der runde Werkstücke geschnitten wurden, ist im Vergleich zu den anderen Versuchsreihen mit einem Wert von $0,65 \text{ mm}^2/\text{s}$ als gering anzusehen. Ebenfalls einen geringen Verschleiß mit einem Wert von $0,77 \text{ mm}^2/\text{s}$ zeigt das Diamantseil aus Versuchsreihe R7, in der auch runde Werkstücke, jedoch mit größerem Eingriffswinkel, geschnitten wurden.

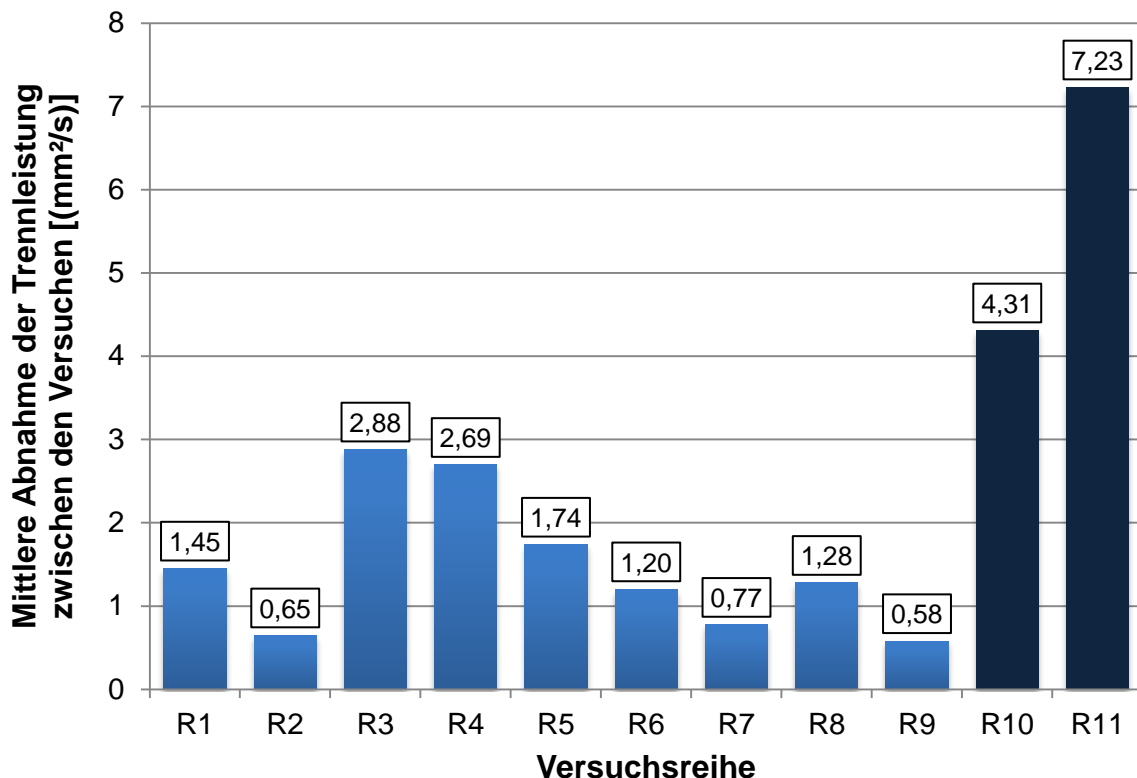


Abbildung 109: Mittlere Abnahme der Trennleistung

Durch Betrachtung der Versuchsreihen R1, R6 und R8 wird ersichtlich, dass die Werte mit Größen von $1,45 \text{ mm}^2/\text{s}$, $1,20 \text{ mm}^2/\text{s}$ und $1,28 \text{ mm}^2/\text{s}$ relativ nahe beieinander liegen. In allen Versuchsreihen wurden rechteckige, quer liegende Werkstücke getrennt, jedoch bei R6 und R8 unter einem größeren Eingriffswinkel sowie bei R8 zusätzlich unter einem größeren Vorschubdruck. Der Verschleiß kann somit bei allen dreien als eine nur wenig von Eingriffswinkel und Vorschubdruck beeinflusste, abhängige Größe aufgefasst werden. Durch den Vergleich von Versuchsreihe R1 mit R6 zeigt sich, dass durch den größeren Eingriffswinkel die mittlere Abnahme der Trennleistung um $0,25 \text{ mm}^2/\text{s}$ verringert wurde und sich somit positiv auf den Verschleiß ausgewirkt hat. Durch die Erhöhung des

Vorschubdrucks ergab sich jedoch wieder ein Anstieg der Trennleistungsdifferenz von 0,08 mm²/s. Ein höherer Vorschubdruck wirkt sich somit negativ auf den Verschleiß aus.

Bei den runden Werkstücken trat bezüglich des Eingriffswinkels jedoch das Gegenteil auf. Die Versuchsreihe R2 und R7 unterscheiden sich nur durch den bei R7 größeren Eingriffswinkel. Dieser führte zu einem Anstieg der mittleren Abnahme der Trennleistungsdifferenz um 0,12 mm²/s. Er wirkte sich also nicht wie bei R1 und R6 in einer Abnahme des Verschleißes aus, sondern es erfolgte ein Anstieg. Es ist deshalb anzunehmen, dass zum einen möglicherweise Toleranzen in der Größenordnung von mindestens 0,12 mm²/s auftreten können und/oder zum anderen der Verschleiß sich bedingt durch die Geometrieform nicht konsistent zu dieser verhält. Möglicherweise ist bei den rechteckigen Werkstücken durch den größeren Eingriffswinkel die Belastung des Diamantseils auf die Kante geringer, da es bei Werkstückeintritt unter einem flacheren Winkel auf die Kante trifft. Das „sanftere“ Auftreffen auf das Werkstück könnte sich positiv auf den Verschleiß auswirken. In Abschnitt 6.7 wird dies genauer betrachtet.

Zusammenfassend lässt sich aus diesen Werten schließen, dass runde Werkstücke weniger Verschleiß verursachen als rechteckige Werkstücke (siehe R2 und R7 vergleichsweise zu R1, R6 und R8). Dementsprechend ist der Kanteneinfluss von signifikanter Bedeutung für den Verschleiß und sollte bei einem Trennprozess mit der Seilsäge möglichst vermieden werden. Falls Kanten unvermeidbar sind, sollten sie unter einem hohen Eingriffswinkel getrennt werden. Ebenfalls wirkt sich eine geringe Schnittgeschwindigkeit positiv auf den Verschleiß aus (siehe R9). Ab einem Wert von mindestens 2,5 mm²/s für die mittlere Abnahme der Trennleistungsdifferenz kann davon ausgegangen werden, dass die Lebensdauer des Diamantseils erreicht worden ist.

6.3 Leistungsfaktor zur Bewertung des Trennprozesses

Um zu prüfen, was für eine Versuchsreihe die höchste Leistung in Relation zum aufgetretenen Verschleiß besitzt, wurde in dieser Arbeit der Quotient aus Gesamtleistung und der zuvor dargestellten mittleren Abnahme der Trennleistung, also dem Verschleiß, gebildet. Hieraus ergibt sich ein dimensionsloser Leistungsfaktor „K“, der eine qualitative Bewertung der Trennprozesse innerhalb der, in diesen Versuchsreihen angewandten Parametern, aufzeigt. Je größer diese Kennzahl K, desto besser ist der Trennprozess zu bewerten. Die Kennzahlen sind in Abbildung 110 dargestellt. Dieser Leistungsfaktor zeigt nur auf, wie sich die Trennleistung innerhalb von zehn Schnitten pro Versuchsreihe auswirkt, nicht welche Auswirkungen auf die sich, bei den verwendeten Parametern, einstellende Lebensdauer besteht, da dies nicht Bestandteil der Versuchsreihen war. Ebenso ist dieser nicht als Grundlage geeignet um tatsächlich entstehende Kosten für einen Schnitt aufzuzeigen.

$$K = \frac{\text{Gesamtleistung der Versuchsreihe}}{\text{mittlere Abnahme der Trennleistung innerhalb der Versuchsreihe}} \quad (13)$$

Wie zu erwarten, besitzen die Versuchsreihen R3, R4, R10 und R11, bei denen die Lebensdauer des Diamantseils erreicht wurde, nur sehr geringe Werte (< 6), die folglich auf einen, im Vergleich mit den anderen Versuchsreihen, ineffektiven Trennprozess hinweisen. Bei den Versuchsreihen war die Leistung nur sehr gering und der Verschleiß signifikant

hoch. Die nächsthöheren Werte besitzen die Versuchsreihen R1 und R5 mit $K = 19,45$ beziehungsweise $K = 17,41$. Die doppelte Anzahl zu trennender Fläche von Versuchsreihe R5 gegenüber R1 besitzt nur wenig Einfluss auf den Leistungsfaktor. Dieser nimmt bedingt durch die doppelte Fläche um 11,7 % ab.

Nahezu einen doppelt so hohen Leistungsfaktor wie die Versuchsreihen R5 besitzt die Versuchsreihe R6. In Versuchsreihe R6 wurden rechteckige liegende Werkstücke unter einem größeren Eingriffswinkel getrennt. Im Vergleich zur Ausgangsversuchsreihe R1 mit $K = 19,45$ (100 %) lag der Leistungsfaktor mit einem Wert von $K = 34,68$ bei 178 %. Der erhöhte Eingriffswinkel ergab somit eine Steigerung von 78 %. Ebenfalls in die Reihe der rechteckigen, liegenden Werkstücke muss die Versuchsreihe R8 mit dem nächst höherem Wert von $K = 38,52$ eingeordnet werden. In dieser wurde neben dem vergrößerten Eingriffswinkel auch der Vorschubdruck von 0,15 MPa auf 0,2 MPa erhöht. Diese Erhöhung resultiert gegenüber der Versuchsreihe R1 (100 %) in einem Wert von 198 %. Die Erhöhung des Vorschubdrucks ergab somit einen Anstieg um 20 % im Leistungsfaktor.

Bei den Versuchsreihen, bei denen rechteckige, liegende Werkstücke getrennt worden sind, erzielte die Versuchsreihe R9 mit einem Leistungsfaktor von $K = 40,24$ den höchsten Wert. Im Vergleich zu der Ausgangsreihe R1 (100 %) liegt ihr Wert bei 207 % des ursprünglichen Leistungsfaktors. Allein durch das Herabsenken der Schnittgeschwindigkeit von 20 m/s auf 15 m/s ergab sich also ein Anstieg des Leistungsfaktors um 107 %. Dies ist darauf zurückzuführen, dass zwar mehr Zeit benötigt wurde, jedoch der Verschleiß am Diamantseil weitaus geringer ausfiel.

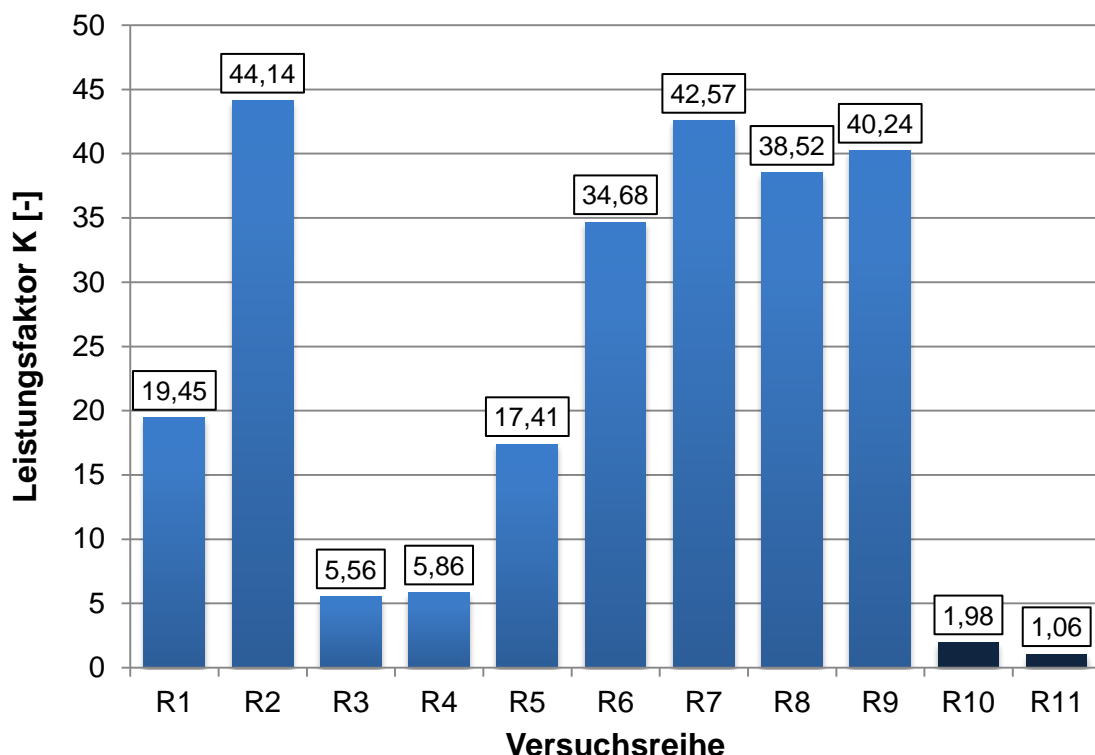


Abbildung 110: Quotient aus Gesamtleistung mit der mittleren Leistungsabnahme für die verschiedenen Versuchsreihen

Die höchsten Leistungsfaktoren erzielten die Versuchsreihen R2 und R7 mit Werten von $K = 44,14$ bzw. $K = 42,57$. Wird die Versuchsreihe R2 als Ausgangsversuchsreihe mit 100 %

angesetzt, so ergibt sich für Versuchsreihe R7 ein Wert von 96,5 %. Die Erhöhung des Eingriffswinkels wirkte sich, anders als bei Versuchsreihen mit rechteckigen, liegenden Werkstücken, negativ aus, was in einer Abnahme des Leistungsfaktors um 3,5 % resultierte.



Ob runde Werkstücke wie in Versuchsreihe R2 oder quer liegende mit geringerer Schnittgeschwindigkeit wie in Versuchsreihe R9 geschnitten werden, hat kaum Einfluss auf den Leistungsfaktor. Ein Vergleich von rechteckigen, quer liegenden Werkstücken mit runden Werkstücken ist jedoch nur unter Berücksichtigung der verschiedenen Randbedingungen möglich. Es ist zu beachten, dass die runden Werkstücke jeweils größere Anfangs- und Endeingriffswinkel als die quer liegenden Werkstücke besitzen. Auch haben die runden Werkstücke keine Kanten, die sich, wie schon gezeigt, negativ auf den Verschleiß auswirken. Bei einem direkten Vergleich, sofern überhaupt möglich, muss dies stets berücksichtigt werden.

Zusammenfassend lässt sich für den Leistungsfaktor eines Trennschnittes ableiten, dass die Geometrie von signifikanter Bedeutung ist (vergleiche R2 und R7 mit R1, R6 und R8). Je nach Geometrie wirkt sich eine Erhöhung des Eingriffswinkels unterschiedlich aus. Bei runden Werkstücken nimmt der Leistungsfaktor leicht ab, während er bei rechteckigen, quer liegenden Werkstücken ansteigt. Der Vorschubdruck beeinflusst ebenfalls den Leistungsfaktor, wie die Versuchsreihen R6 und R8 beweisen. Der wichtigste Parameter in der Beeinflussung des Leistungsfaktors ist die Schnittgeschwindigkeit. Eine Reduktion der Schnittgeschwindigkeit ergab eine Erhöhung des Leistungsfaktors um 107 % (vergleiche R1 mit R8).

6.4 Schnittgeschwindigkeit

Der Einstellparameter der Schnittgeschwindigkeit ist eine bedeutende Größe, wie der Vergleich von R1 und R9 in der Betrachtung des Leistungsfaktors zeigt. Die Versuchsreihe R1 besitzt einen Wert von $K = 19,45$, während dem gegenüber die Versuchsreihe R9 einen Wert von $K = 40,24$ besitzt, was einer Steigerung um 107 % entspricht. Es zeigt sich also, dass eine Herabsetzung der Schnittgeschwindigkeit eine Steigerung des Leistungsfaktors bewirkt. Tabelle 10 stellt diese Ergebnisse gegenüber.

Tabelle 10: Vergleich der Versuchsreihen R1 und R9

	R1	R9
Geometrie		
Material	Vergüteter Baustahl	Vergüteter Baustahl
Vorschub [MPa]	0,15	0,15
Schnittgeschwindigkeit [m/s]	20	15
Mittlere Spangröße [μm]	173,8	192,4
Mittlere Trennzeiterhöhung [s]	37,00	20,88
Mittlere Gesamtleistung [mm^2/s]	28,21	23,29
Mittlere Leistungsdifferenz [mm^2/s]	1,45	0,58
Leistungsfaktor K	19,45	40,24

Im direkten Vergleich zeigt sich, wie sich die Senkung der Schnittgeschwindigkeit von 20 m/s auf 15 m/s auswirkt. Die Trennzeit erhöht sich von anfänglich 567 Sekunden auf

770 Sekunden, was einem Anstieg von 36 % entspricht. Abbildung 111 zeigt anschaulich die hohen Abweichungen im Trennzeitverlauf der Versuchsreihe R9. Je langsamer geschnitten wird, desto größer sind die Unregelmäßigkeiten in der Trennzeit. Dies kann dadurch erklärt werden, dass sich durch die geringe Schnittgeschwindigkeit Störgrößen leichter hervorheben können, was in zunehmenden Abweichungen resultiert.

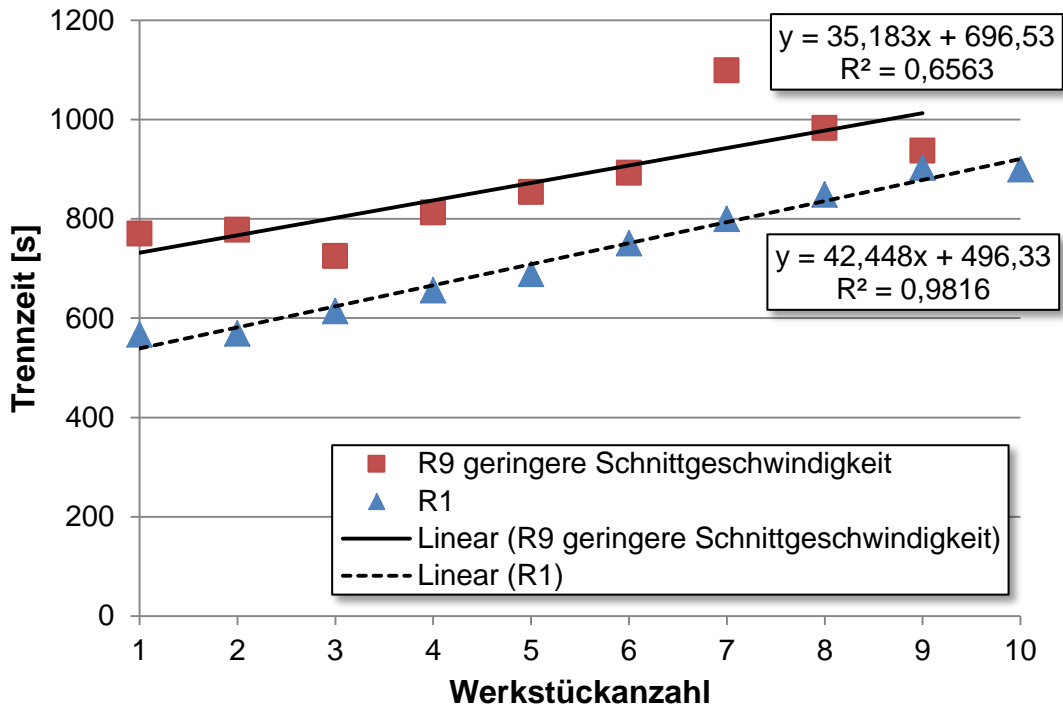


Abbildung 111: Vergleich der Trennzeiten für die Versuchsreihen R1 und R9

Die Werte für die Trennzeit wurden mit einer linearen Geraden approximiert. Das Bestimmtheitsmaß R^2 gibt an, zu wie viel Prozent die Gerade den einzelnen Punkten entspricht. Es ist definiert als:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \quad (14)$$

Y_i = tatsächlicher Wert

\hat{Y}_i = geschätzter Wert

\bar{Y}_i = Mittelwert

Die Summe $\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$ gibt dabei die Variation der Abweichungen an, also die durch das Modell nicht erklärte Variation. Die Summe im Nenner $\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2$ hingegen gibt die Variation von Y an. Der Wert für R^2 liegt zwischen 0 % und 100 %, d.h. kein bzw. perfekter linearer Zusammenhang.

Für die Versuchsreihe R1 ist ein Wert von 98 % erreicht worden, der als sehr gut angesehen werden kann. Für die Versuchsreihe R9 ist aufgrund ihrer starken Abweichungen nur ein Wert von 65 % erzielt worden, der noch als ausreichend zu betrachten ist.

Die Trendline ist linear und kann deshalb mathematisch als eine Gerade beschrieben werden. Dabei wird der y-Wert, der die Trennzeit angibt durch das passendere "t"

angegeben. Die Werkstückanzahl, die den x-Wert wiedergibt bleibt mit "x" bestehen. Also folglich "t" für Trennzeit und "x" für Werkstückanzahl.

Die Formel für die Annäherungsgeraden lautet für Versuchsreihe R1:

$$t = 42,448 \cdot x + 496,33 \quad (15)$$

Für die Versuchsreihe R9 gilt:

$$t = 35,183 \cdot x + 696,53 \quad (16)$$

Vorausgesetzt, die Werte würden für die nachfolgenden Versuche diesem linearen Anstieg folgen, so würde ab dem Versuch 28 die Versuchsreihe R9 geringe Trennzeiten aufweisen als die Versuchsreihe R1.

Durch Subtraktion der Formeln (16) - (15) ergibt sich für eine Reduktion der Schnittgeschwindigkeit um 5 m/s folgende Änderung, wobei y durch die Trennzeit t ersetzt werden kann:

$$\Delta t_{5 \text{ m/s}} = -7,265 \cdot x + 200,2 \quad (17)$$

Bei einer Abnahme der Trenngeschwindigkeit um 5 m/s verringert sich die Steigerung der Trennzeit um den Faktor 7,265 und die anfängliche Trennzeit erhöht sich um 200,2 Sekunden. Die Formel gilt nur unter den gegebenen Randbedingungen. Die allgemeine Formel für die Trennzeitdifferenz bei Schnittgeschwindigkeitsänderung kann beschrieben werden mit:

$$\Delta t(\Delta \text{Schnittgeschwindigkeit}) = a_i \cdot x + b_i \quad (18)$$

Wobei die Werte a_i und b_i anhand einer größeren Datenbasis, die sich durch weitere Untersuchungen ergibt, ermittelt werden können. Dieser erste Ansatz erlaubt nur die grobe Betrachtung der zu erwartenden Tendenzen.

6.5 Verdrillung



Um den potentiellen Effekt der Verdrillung zu untersuchen, wurden die Versuchsreihen R3 und R4 durchgeführt. In der Praxis kommt eine Verdrillung häufig zur Anwendung, um einen vermeintlich gleichmäßigeren Abtrag am Diamantsegmentumfang zu erreichen. In beiden Versuchsreihen wurden rechteckige, hochkant stehende Werkstücke getrennt. In der Versuchsreihe R3 kam eine Verdrillung von 360° pro laufenden Meter Diamantseil zum Einsatz, während das Diamantseil von Versuchsreihe R4 ohne Verdrillung verwendet wurde. Die Diamantseillänge betrug, wie in jeder Versuchsreihe, 9,5 m, weshalb folglich das Diamantseil in R3 um etwa 3600° eingedreht wurde, bevor die Enden miteinander verbunden wurden.

Die beiden Versuchsreihen wurden vorzeitig beendet, da jeweils die Lebensdauer des Diamantseils erreicht wurde und deshalb kein weiterer Versuch mit diesem vorgenommen werden konnte. Der Trennzeitverlauf beider Versuchsreihen lässt sich, im Gegensatz zu den anderen Versuchsreihen, nicht mit einer Geraden, sondern anhand eines Polynoms beschreiben. Da bei diesen Versuchsreihen die Lebensdauer erreicht worden ist, ist davon

auszugehen, dass sich dieser qualitative Verlauf des Polynoms auch bei den anderen Versuchsreihen mit fortgeschrittenem Stadium einstellen wird.

Die Werte für die beiden Versuchsreihen sind sehr kongruent. Selbst bei der mittleren Spangröße liegt der Unterschied bei nur 1 % und für die mittlere Gesamtleistung bei 1,3 %. Dieser Umstand wird auch durch Abbildung 112, in der der Vergleich der Trennzeiten für die Versuchsreihe R3 und R4 sowie deren Annäherungspolynom dargestellt ist, deutlich.

Tabelle 11: Vergleich der Versuchsreihen R3 und R4

	R3	R4
Besonderheit	Mit Verdrillung	Ohne Verdrillung
Geometrie		
Material	Vergüteter Baustahl	Vergüteter Baustahl
Vorschub [MPa]	0,15	0,15
Schnittgeschwindigkeit [m/s]	20	20
Mittlere Spangröße [µm]	167,1	168,9
Mittlere Trennzeiterhöhung [s]	417	543
Mittlere Gesamtleistung [mm²/s]	16,0	15,78
Mittlere Leistungsdifferenz [mm²/s]	2,88	2,69
Leistungsfaktor K	5,56	5,86

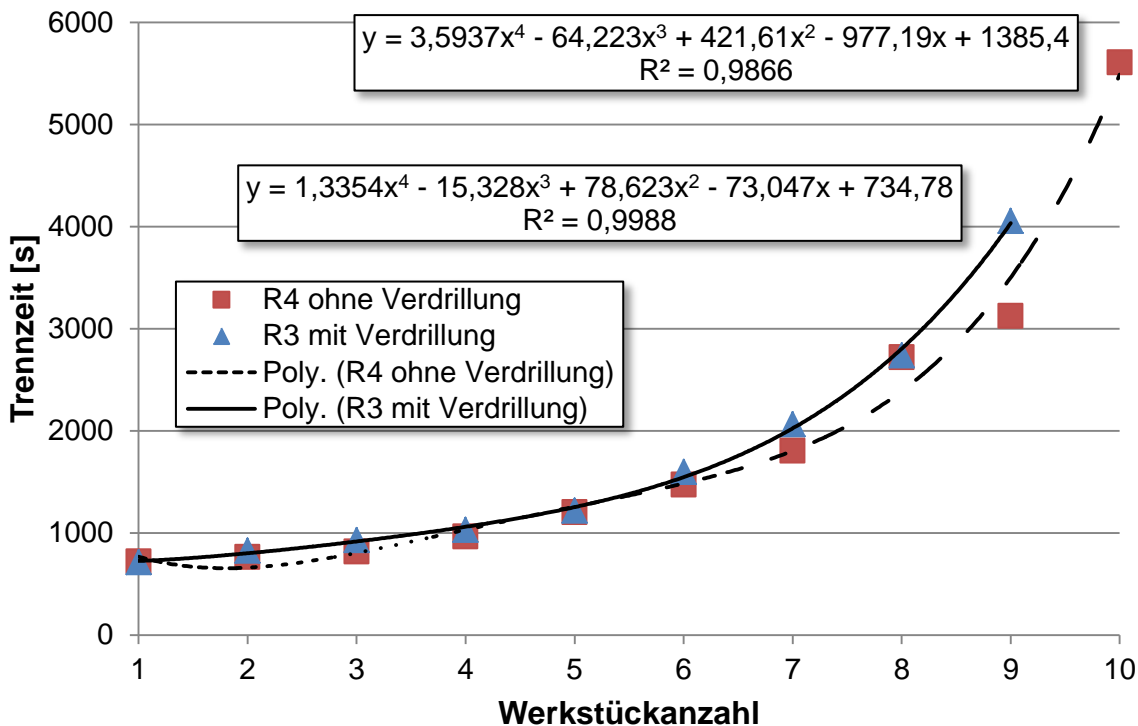


Abbildung 112: Vergleich der Trennzeiten für die Versuchsreihe R3 und R4

Wie beschrieben können die Werte für die Trennzeit mit einem Polynom approximiert werden. Um eine möglichst hohes Bestimmtheitsmaß R^2 zu erhalten, wurde ein Polynom

4. Ordnung gewählt. Für die Versuchsreihe R3 ist ein Wert von 99,8 % erreicht worden und für die Versuchsreihe R4 ist für die Approximation ein Wert von 98,7 % erzielt worden.

Die Formel für das Polynom der Versuchsreihe R3 lautet:

$$t = 1,3354 \cdot x^4 - 15,328 \cdot x^3 + 78,623 \cdot x^2 - 73,047 \cdot x + 734,78 \quad (19)$$

Für die Versuchsreihe R4 lautet die Formel:

$$t = 3,5937 \cdot x^4 - 64,223 \cdot x^3 + 421,61 \cdot x^2 - 977,197 \cdot x + 1385,4 \quad (20)$$

Neben den Zahlenwerten ist die Ähnlichkeit der Trennzeitverläufe zwischen Versuchsreihe R3 und R4 sehr auffällig, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass die Verdrillung des Diamantseils nur sehr wenig bis keinen Einfluss auf den Trennprozess besitzt. Zumindest trifft dies bei der verwendeten Anordnung des Versuchstandes und bei den für die Reihen gewählten Einstellparametern zu. Es ist im Rahmen des Möglichen, dass das Diamantseil bei dieser Anordnung eine Eigenrotation initiiert, die ohne die Hilfe der Verdrillung abläuft und sich deshalb kein nennenswerter Effekt einstellt. Um die potentielle Wirkungsweise beziehungsweise den wirklichen Vorteil einer Verdrillung genauer zu beschreiben, sind weitere Untersuchungen in diesem Bereich notwendig.

6.6 Vorschubdruck

Der Einfluss des Vorschubdrucks lässt sich anhand des Vergleichs der Versuchsreihen R6 und R8 herleiten. In beiden Versuchsreihen wurden rechteckige, quer liegende Werkstücke unter einem großen Eingriffswinkel getrennt. Wie bereits zuvor beschrieben, erzielte die Versuchsreihe R8 hinsichtlich der Leistung den Höchstwert im kompletten Versuchsfeld. Die Versuchsreihe R6 erzielte den zweithöchsten Leistungswert.



Die in Tabelle 12 gelisteten Werte liegen nahe beieinander und unterscheiden sich nur leicht. Durch Betrachtung des Leistungsfaktors ist bei einer Erhöhung des Vorschubdrucks um 33 % von 0,15 MPa auf 0,2 MPa ein Anstieg von ca. 10 % zu verzeichnen. Die mittlere Trennzeiterhöhung sinkt um ca. 3,3 Sekunden ab, während die mittlere Leistungsdifferenz minimal ansteigt beziehungsweise unter Berücksichtigung der Toleranzen als nahezu gleichbleibend anzusehen ist. Die Erhöhung des Vorschubdrucks wirkte sich somit nur minimal auf den Verschleiß am Diamantseil aus. Dies zeigt die signifikante Bedeutung des Vorschubdrucks auf den Trennprozess. Bei gleichbleibendem beziehungsweise minimal steigendem Verschleiß erhöht sich, durch die Erhöhung des Vorschubdrucks, die Gesamtleistung. Ebenso verringert sich dadurch die Trennzeit, was wiederum in einer Erhöhung des Leistungsfaktors resultiert.

Beachtet werden muss jedoch, dass durch einen erhöhten Vorschubdruck auch die Gefahr eines Diamantseilrisses steigt, da das Diamantseil einer höheren Belastung ausgesetzt ist. Wahrscheinlichkeitsdaten, wie oft sich ein Diamantseilriss vollzieht, liegen derzeit nicht vor und müssten, falls eine Wirtschaftlichkeitsrechnung aufgestellt werden sollte, ermittelt werden. Ebenso ist zu beachten, dass der Vorschubdruck nicht endlos gesteigert werden kann, da dieser durch die zur Verfügung stehende Maschinenteknik begrenzt ist.

In Abbildung 113 dargestellt ist der Vergleich der Trennzeiten für die Versuchsreihen R6 und R8. Die beiden Trennzeitverläufe sind nahezu linear, weshalb sie wieder mit einer Geraden approximiert werden können. Die Geraden zeigen ein deutliches Auseinanderlaufen, so dass

kein Schnittpunkt zu erwarten ist. Das Bestimmtheitsmaß spiegelt dies mit Werten von jeweils 98,2 % beziehungsweise 97,9 % deutlich wieder.

Tabelle 12: Vergleich der Versuchsreihen R6 und R8

	R6	R8
Besonderheit	Eingriffswinkel vergrößert	Eingriffswinkel vergrößert Vorschubdruck erhöht
Geometrie		
Material	Vergüteter Baustahl	Vergüteter Baustahl
Vorschub [MPa]	0,15	0,2
Schnittgeschwindigkeit [m/s]	20	20
Mittlere Spangröße [µm]	218,70	235,51
Mittlere Trennzeiterhöhung [s]	13,78	10,44
Mittlere Gesamtleistung [mm²/s]	41,65	49,23
Mittlere Leistungsdifferenz [mm²/s]	1,20	1,28
Leistungsfaktor K	34,68	38,52

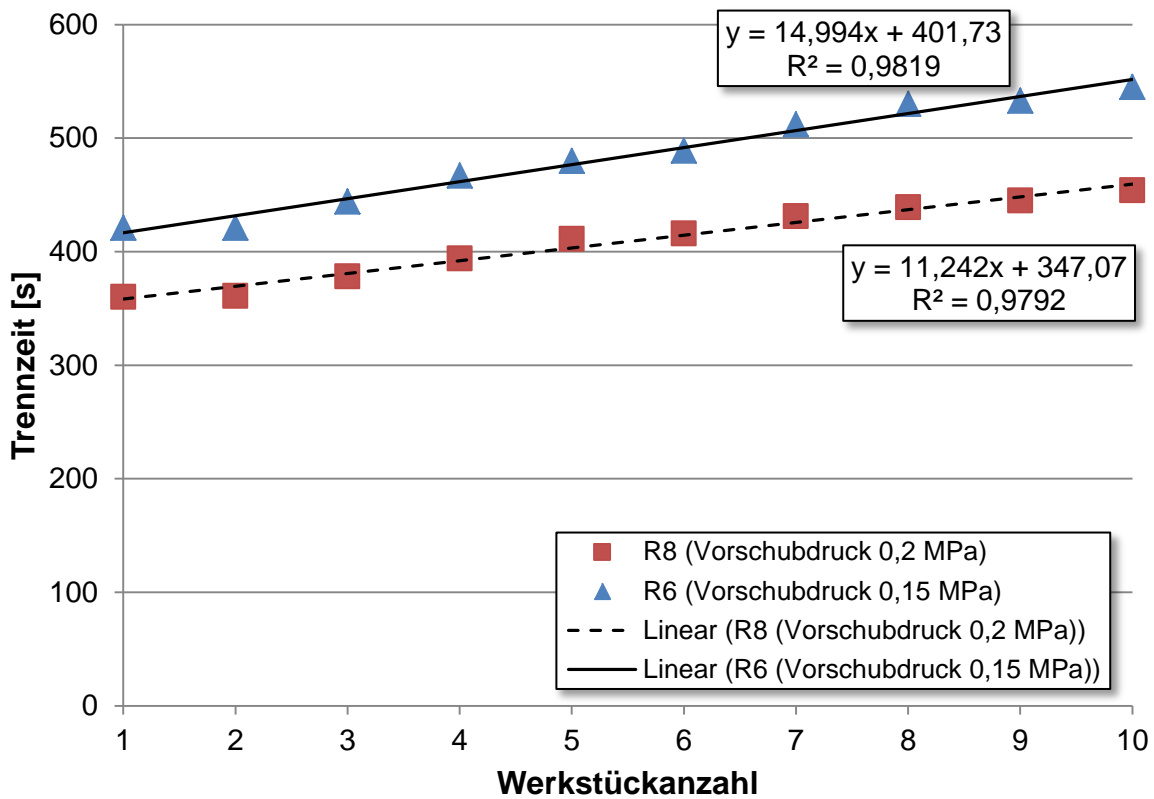


Abbildung 113: Vergleich der Trennzeiten für die Versuchsreihen R6 und R8

Die Formel für die Gerade der Versuchsreihe R6 lautet:

$$t = 14,994 \cdot x + 401,73 \quad (21)$$

Für die Versuchsreihe R8 lautet die Formel:

$$t = 11,242 \cdot x + 347,07 \quad (22)$$

Um die Formel zu erhalten, die die Differenz für den Vorschubdruck enthält, werden die beiden Gleichungen voneinander abgezogen. So ergibt sich durch Subtraktion der Formeln (22) - (20) eine Gerade, die die Erhöhung des Vorschubdrucks um 0,05 MPa abbildet. Diese Gerade lautet wie folgt, wobei y wieder durch die Trennzeit t ersetzt werden kann:

$$\Delta t_{0,05 \text{ MPa}} = -3,752 \cdot x - 54,66 \quad (23)$$

Bei einer Zunahme des Vorschubdrucks um 0,05 MPa verringert sich die Steigung der Trennzeit um den Faktor 3,752 und die anfängliche Trennzeit verringert sich um 54,66 Sekunden. Die allgemeine Formel für die Trennzeitudifferenz bei Vorschubdruckänderung kann also beschrieben werden mit:

$$\Delta t(\Delta \text{Vorschubdruck}) = c_i \cdot x + d_i \quad (24)$$

Die Formel (24) gilt nur unter den gegebenen Randbedingungen und darf nicht verallgemeinert werden. Dieser erste Ansatz erlaubt nur die grobe Betrachtung der zu erwartenden Tendenzen. Um genauere Aussagen treffen zu können, sind wiederum weitere Untersuchungen notwendig.

Wie sich gezeigt hat, stellt der Vorschubdruck eine bedeutende Größe für den Trennprozess mit einer Seilsäge dar. Je größer der Vorschubdruck, desto geringer sind die Trennzeiten und desto effizienter wird der Trennprozess, wobei nur minimaler bis kein Verschleißanstieg zu erwarten ist. Aus diesen Untersuchungen lässt sich deshalb entnehmen, dass Werkstücke immer unter einem möglichst hohen Druck getrennt werden sollten.

6.7 Eingriffswinkel

Der Eingriffswinkel erweist sich als eine schwer vergleichbare Einflussgröße, da der Eingriffswinkel beim umschlingenden Verfahren stets einer Änderung unterworfen ist. Diese Änderung wiederum ist stark von der Kontur eines Werkstücks abhängig.

Aus diesem Grund werden zwei Geometriegruppen verglichen. Zum einen wurden die Versuchsreihen R1 und R6 gegenübergestellt, in denen rechteckige, quer liegende Werkstücke getrennt wurden. Zum anderen wurden die Versuchsreihen R2 und R7, in denen runde Werkstücke geschnitten wurden, vergleichend beurteilt.

Bei den Versuchsreihen R6 und R7, die unter einem größeren Eingriffswinkel getrennt wurden, sind die Werkstücke um 5 cm herabgesetzt worden. Abbildung 114 und Abbildung 115 stellen die Winkelverhältnisse dar, die durch diese Änderung hervorgerufen werden. Bei den rechteckigen, quer liegenden Werkstücken verringert sich der Anfangswinkel von 40° auf 35° und der Endwinkel von 24° auf 18°. Somit ergibt sich im Mittel eine Änderung von $\Delta \text{Eingriffswinkel}_{\text{rechteckig quer liegend}}$ um 5,5°. Bei den runden Werkstücken ergibt sich eine

Änderung des Anfangswinkels von 37° auf 33° und beim Endwinkel von 20° auf 14° . Die mittlere Differenz ergibt somit einen $\Delta\text{Eingriffswinkel}_{\text{rund}}$ von 5° .

Tabelle 13 zeigt die Werte für die Versuchsreihen. Für die mittlere Spangröße gilt, dass sie bei größerem Eingriffswinkel ansteigt. Bei den rechteckig quer liegenden Werkstücken von $173,8 \mu\text{m}$ auf $218,7 \mu\text{m}$ beziehungsweise bei den runden Werkstücken von $178,4 \mu\text{m}$ auf $209,68 \mu\text{m}$. Ebenfalls verringert sich mit steigendem Eingriffswinkel die mittlere Trennzeiterhöhung bei den rechteckigen Werkstücken um 68% und bei den runden Werkstücken um 13% . Entgegen der Erwartung verringert sich bei größerem Eingriffswinkel bei den rechteckig quer liegenden Werkstücken die mittlere Leistungsdifferenz um 21% , während sie bei den runden Werkstücken um 15% ansteigt.

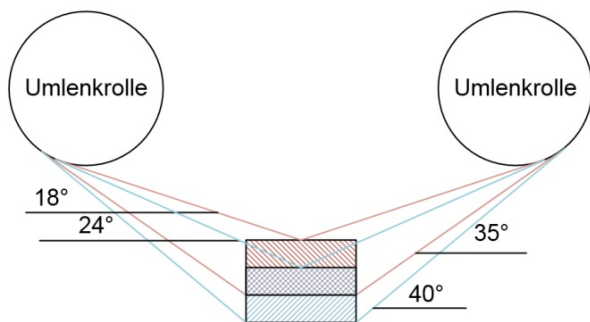


Abbildung 114: Winkeländerung durch Herabsetzen von rechteckigen, quer liegenden Werkstücken um 5 cm

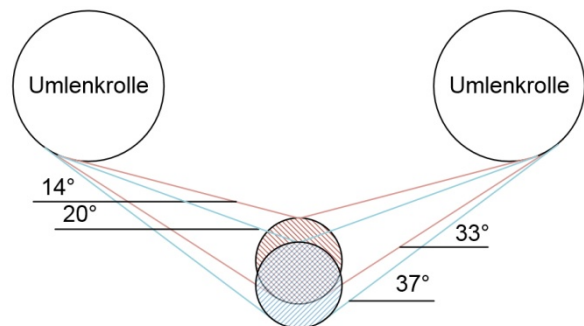






Abbildung 115: Winkeländerung durch Herabsetzen von runden Werkstücken um 5 cm

Durch die gegenläufigen mittleren Leistungsdifferenztendenzen verläuft auch der Leistungsfaktor unterschiedlich. Bei den rechteckigen, quer liegenden Werkstücken erhöht sich mit größerem Eingriffswinkel den Leistungsfaktor um 78% , während er bei den runden Werkstücken um $3,5 \%$ abnimmt.

Tabelle 13: Vergleich von Versuchsreihe R1 und R6 sowie R2 und R7

	R1	R6	R2	R7
Besonderheit	-	Eingriffswinkel vergrößert	-	Eingriffswinkel vergrößert
Geometrie				
Material	vergüteter Baustahl	vergüteter Baustahl	vergüteter Baustahl	vergüteter Baustahl
Vorschub [MPa]	0,15	0,15	0,15	0,15
Schnittgeschwindigkeit [m/s]	20	20	20	20
Mittlere Spangröße [μm]	173,8	218,70	178,4	209,68
Mittlere Trennzeiterhöhung [s]	37,00	13,78	16,10	14,30
Mittlere Gesamtleistung [mm^2/s]	28,21	41,65	28,59	32,97
Mittlere Leistungsdifferenz [mm^2/s]	1,45	1,20	0,65	0,77
Leistungsfaktor K	19,45	34,68	44,14	42,57

In Abbildung 116 ist der Vergleich der Trennzeiten für die Versuchsreihen R1 und R6 sowie R2 und R7 dargestellt. Die Trennzeitverläufe sind wieder nahezu linear, weshalb sie alle mit einer Geraden approximiert werden können. Das Bestimmtheitsmaß untermauert diese Tatsache mit Werten von jeweils 98,2 %, 98,5 %, 98,2 % und 91,4 %. Dieser letzte, geringere Wert lässt sich dadurch erklären, dass in Versuchsreihe R2 W10 als Ausreißer angesehen werden kann, der für das geringere Bestimmtheitsmaß verantwortlich ist.

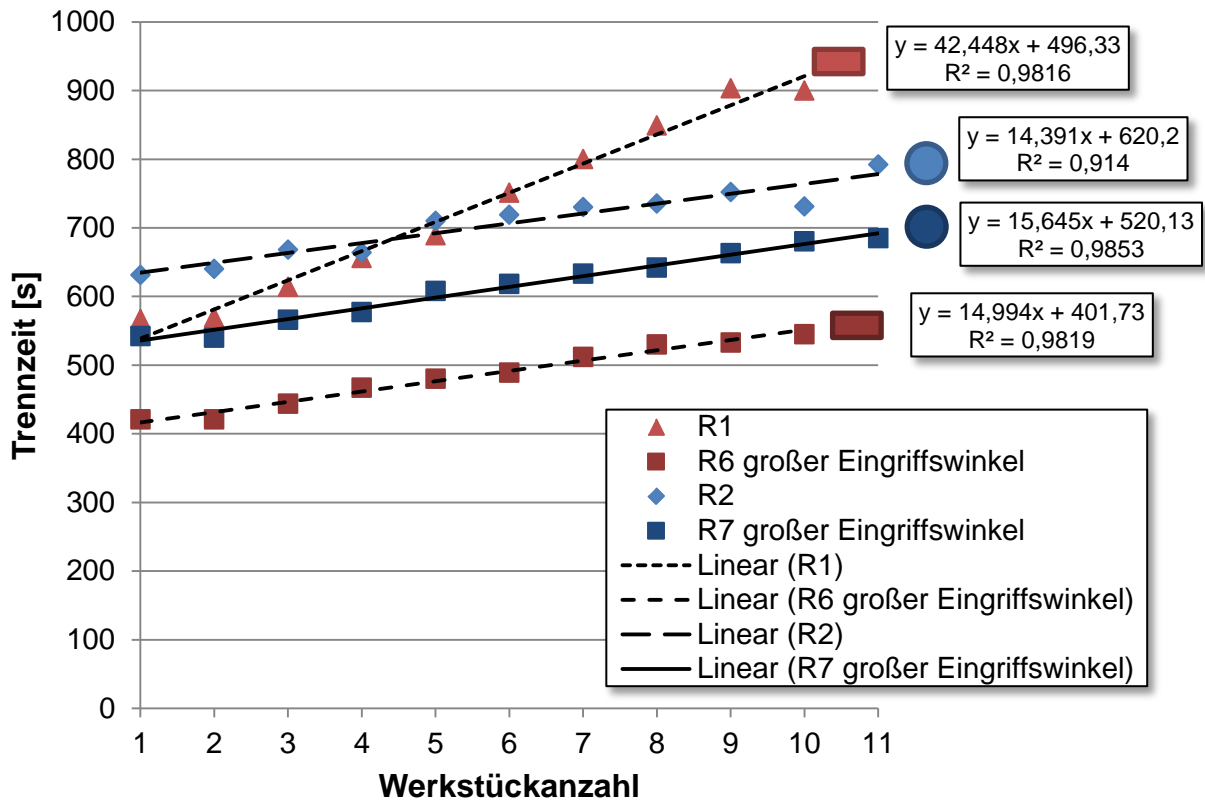


Abbildung 116: Vergleich der Trennzeiten für die Versuchsreihe R1, R6 sowie R2 und R7

Die approximierten Geraden für die runden Werkstücke, also R2 und R7, zeigen einen fast parallelen Verlauf, die sich jedoch einander annähern, so dass ein Schnittpunkt bei dem Versuch W79 zu erwarten ist. Dass dieser lineare Verlauf bis in diese hohe Versuchszahl erhalten bleibt, ist, unter Berücksichtigung der Versuchsreihe R3 und R4, in denen einem Polynom entsprechenden Trennzeitenverlauf gegen Standzeitende des Diamantseils eintrat, nicht zu erwarten.

Die Geradengleichung für die rechteckigen, quer liegenden Werkstücke der Versuchsreihe R1 lautet:

$$t = 42,448 \cdot x + 496,33 \quad (25)$$

Für die Versuchsreihe R6 lautet die Formel:

$$t = 14,994 \cdot x + 401,73 \quad (26)$$

Die Geradengleichung für die runden Werkstücke aus Versuchsreihe R2 hat die Form:

$$t = 14,391 \cdot x + 620,2 \quad (27)$$

Und für die Versuchsreihe R7 lautet die Formel:

$$t = 15,645 \cdot x + 520,13 \quad (28)$$

Um die Formel zu erhalten, die den Einstellparameter des Eingriffswinkels wiedergibt, werden die beiden Gleichungen für jeweils rechteckige, quer liegende und runde Werkstücke voneinander abgezogen. So ergibt sich durch Subtraktion der Formeln (26) - (25) beziehungsweise (28) - (27) eine Geradengleichung, die den Einfluss des Eingriffswinkels zeigt. Der Begriff „rechteckige, quer liegende“ wird in den folgenden Formeln mit „rq“ abgekürzt. Diese Gerade für rechteckige, quer liegende Werkstücke, wobei y wieder durch die Trennzeit t ersetzt werden kann, lautet:

$$\Delta t_{\Delta \text{Eingriffswinkel},rq} = 27,454 \cdot x + 94,6 \quad (29)$$

Die Geradengleichung für runde Werkstücke, wobei y wieder durch die Trennzeit t ersetzt werden kann, hat die Form:

$$\Delta t_{\Delta \text{Eingriffswinkel},rund} = -1,254 \cdot x + 100,07 \quad (30)$$

Bei einer Zunahme des Eingriffswinkels um $5,5^\circ$ verringert sich für rechteckige, quer liegende Werkstücke die Steigerung der Trennzeit um den Faktor 27,45 und die anfängliche Trennzeit verringert sich um 94,6 Sekunden. Bei runden Werkstücken erhöht sich durch den im Mittel um 5° höheren Eingriffswinkel die Steigerung der Trennzeit um den Faktor 1,254 pro Versuch und die anfängliche Trennzeit verringert sich um etwa 100 Sekunden.

Wie den Daten zu entnehmen ist, verringert sich der Verschleiß mit steigendem Eingriffswinkel bei rechteckigen, quer liegenden Werkstücken, während er sich bei runden Werkstücken vergrößert. Eine Erklärung für die Gegenläufigkeit der Versuchsreihen mit rechteckigen, quer liegenden und runden Werkstücken liegt möglicherweise in dem Kanteneinfluss. Bei den rechteckigen, quer liegenden Werkstücken sind zu Beginn des Trennprozesses der Versuchsreihe R1 nur wenige Diamantsegmente bis hin zu nur einem Diamantsegment unter einem bestimmten Winkel im Kontakt mit der Kante des Werkstücks. Abbildung 117 verdeutlicht die Eingriffsverhältnisse, die jeweils zu Beginn des Trennprozesses auftreten.

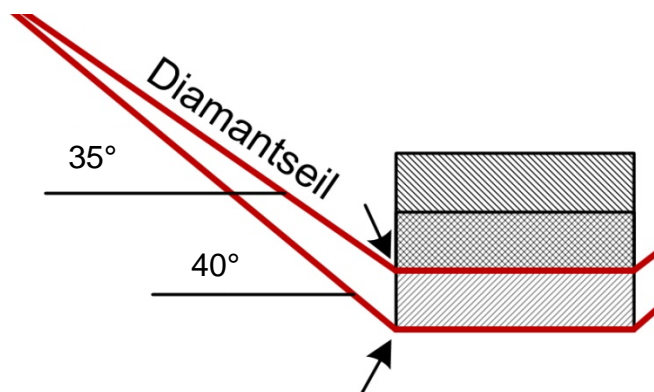


Abbildung 117: Detailbetrachtung der Winkel zu Beginn des Trennprozesses

Zu Beginn des Trennprozesses ist nur maximal ein Diamantsegment im Eingriff mit dem Werkstück. Möglicherweise wirkt es sich verschleißschonend auf die Diamantsegmente aus, wenn sie unter einem größeren Eingriffswinkel auf das Werkstück auftreffen, da sie dadurch

eine geringere Schlagkraft beim Auftreffen auf die Kante erfahren. Bei den runden Werkstücken findet keine Schlagwirkung statt, da sich das Diamantseil unter jedem Eingriffswinkel sehr gut an die runde Form anpassen kann.




Es hat sich gezeigt, dass sich der Eingriffswinkel in Abhängigkeit der Geometrie unterschiedlich auswirken kann. Das Verhalten von rechteckigen, quer liegenden und runden Werkstücken ist bei einem vergrößerten Eingriffswinkel gegenläufig. Bei rechteckigen, quer liegenden Werkstücken verringert sich der Verschleiß am Diamantseil während sich bei runden Werkstücken der Verschleiß nahezu konstant verhält.

Des Weiteren ist festzuhalten, dass sich die Leistung bei beiden Versuchsreihen, vor allem aber bei rechteckigen, quer liegenden Werkstücken, signifikant erhöht, je größer der Eingriffswinkel ausfällt. Eine relativ geringe Winkeländerung von 5° wirkt sich so stark auf den Trennprozess aus, dass bei den rechteckigen, quer liegenden Werkstücken der Leistungsfaktor um 78 % ansteigt. Ebenso bleibt festzuhalten, dass ein höherer Eingriffswinkel unabhängig von der Geometrie in einer höheren Schnittleistung und somit in einer Trennzeitminderung resultiert.

6.8 Geometrie

Die Auswirkung der Geometrie wurde in den Versuchsreihen R1, R2 und R3 untersucht. In Versuchsreihe R1 wurden rechteckige, quer liegende Werkstücke, in Versuchsreihe R2 runde Werkstücke und in Versuchsreihe R3 rechteckige, hochkant stehende Werkstücke getrennt. Alle Werkstücke besitzen näherungsweise den gleichen Flächeninhalt und wurden unter gleichen Voraussetzungen, wie beispielsweise gleicher Schnittgeschwindigkeit und gleichem Vorschubdruck, getrennt. Die Versuchsreihe R3 musste bereits nach neun Versuchen vorzeitig beendet werden, da die Lebensdauer des Diamantseils erreicht worden war. Bei den beiden anderen Versuchsreihen war die Lebensdauer noch nicht erreicht. Diese Tatsache zeigt, dass die Geometrie einen Einfluss den Trennprozess besitzt.

Tabelle 14: Vergleich der Versuchsreihen R1,R2 und R3

	R1	R2	R3
Geometrie			
Material	Vergüteter Baustahl	Vergüteter Baustahl	Vergüteter Baustahl
Vorschub [MPa]	0,15	0,15	0,15
Schnittgeschwindigkeit [m/s]	20	20	20
Mittlere Spangröße [μm]	173,8	178,4	167,1
Mittlere Trennzeiterhöhung [s]	37,00	16,10	417
Mittlere Gesamtleistung [mm^2/s]	28,21	28,59	16,0
Mittlere Leistungsdifferenz [mm^2/s]	1,45	0,65	2,88
Leistungsfaktor K	19,45	44,14	5,56

Die Werte für die verschiedenen Versuchsreihen sind breit gestreut ausgefallen. Die mittlere Spangröße ist bei allen drei Versuchsreihen nahezu konstant, wobei die mittlere Spangröße mit der mittleren Leistung und dem Leistungsfaktor korreliert. Die mittlere Trennzeiterhöhung

wich stark voneinander ab. Die Versuchsreihe R2 erzielte im Schnitt eine Trennzeiterhöhung von 16,1 Sekunden pro Versuch, während es bei Versuchsreihe R1 mit 37 Sekunden mehr als doppelt so viel ist. Versuchsreihe R3 benötigte sogar 417 Sekunden. Die mittlere Gesamtleistung war für die Versuchsreihen R1 und R2 mit Werten von 28,21 mm²/s und 28,59 mm²/s nahezu gleichbleibend, während sie bei der Versuchsreihe R3 nur 16,0 mm²/s betrug.

Ebenfalls wurde festgestellt, dass die mittlere Leistungsdifferenz als Indikator für den Verschleiß angesehen werden kann. Den geringsten Wert erzielte die Versuchsreihe R2 mit 0,65 mm²/s. Wird dies als Basiswert von 100 % angesetzt, so benötigte die Versuchsreihe R1 223 % und die Versuchsreihe R3 443 %. Der Wert des Leistungsfaktors spiegelt ebenfalls ein genaues Bild wider. Er lag für die runden Werkstücke der Versuchsreihe R2 bei 44,14 gefolgt von den rechteckigen, quer liegenden Werkstücken der Versuchsreihe R1 bei denen er einen Wert von 19,45 erreichte. Den geringsten Leistungsfaktor besitzen die rechteckigen, hochkant stehenden Werkstücke der Versuchsreihe R3, die einen Wert von 5,56 erreichten.

Diese Daten sprechen dafür, dass es innerhalb der gesetzten Rahmenbedingungen, die bei diesen Versuchen angewendet wurden, am effizientesten ist, runde Werkstücke zu trennen. Aufgrund der fehlenden Kante, an der die Diamantsegmente zumindest bei Beginn des Trennprozesses bei rechteckigen Werkstücken einer Schlagwirkung ausgesetzt sind, produziert der Trennprozess weniger Verschleiß am Werkzeug. Das Diamantseil kann sich bei runden Werkstücken stets optimal an die Oberfläche des Werkstücks anpassen.

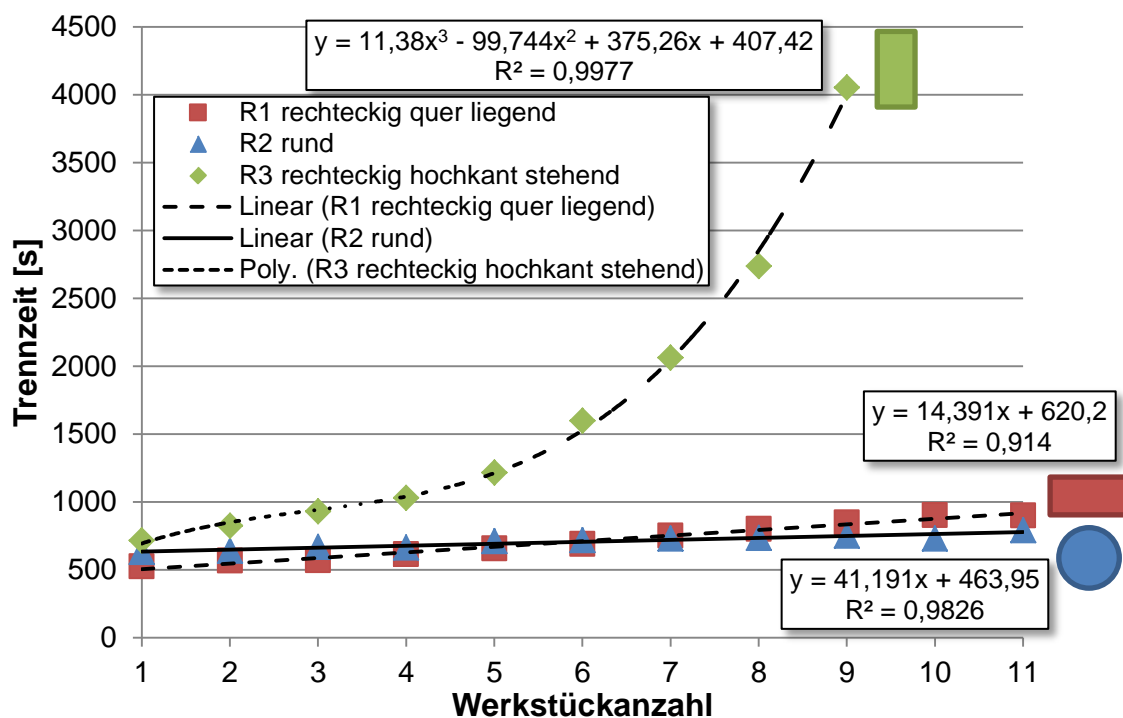


Abbildung 118: Vergleich der Trennzeiten für die Versuchsreihen R1, R2 und R3

Durch Betrachtung der rechteckigen Werkstücke ist festzustellen, dass es aus Sicht des Leistungsfaktors effizienter ist, den Trennprozess so zu steuern, dass anstatt hochkant stehender Werkstücke quer liegende getrennt werden. Die hochkant stehenden Werkstücke waren nur unter hohem Verschleiß und steigender Trennzeit zu schneiden. Da lediglich die Geometrie geändert wurde, ist die auftretende Differenz auf die Eingriffslänge

zurückzuführen. Folglich steigt bei kürzerer Eingriffslänge der Verschleiß am Diamantseil. Da die Vorschubkraft konstant gehalten wird, erfahren die Diamantsegmente vor allem zu Beginn des Schnittes, bei dem sich nur eine kurze Seillänge im Eingriff befindet, mehr spezifischen Druck. Bei einer längeren Eingriffslänge verteilt sich die Kraft auf mehrere Diamantsegmente; dadurch sinkt der spezifische Druck, der auf ein Segment wirkt. Dies lässt sich leicht durch folgende Formel darstellen:

$$F = p \cdot A \quad (31)$$

Bleibt die Kraft (F) konstant und verringert sich die Fläche (A), so steigt der Druck (p), der auf die Diamantsegmente wirkt. Bei den rechteckigen, hochkant stehenden Werkstücken entspricht die mittlere Eingriffslänge annähernd der Hälfte eines quer liegenden Werkstücks. Trotzdem verdoppelt sich die resultierende Trennzeit nicht, sondern steigt fast exponentiell an, wie in Abbildung 118 dargestellt ist.

Die runden Werkstücke aus Versuchsreihe R2 besitzen gegenüber Versuchsreihe R1 zu Beginn höhere Trennzeiten. Aufgrund des geringeren Verschleißes bei den runden Werkstücken verkehrt sich dieser Umstand und die rechteckigen, quer liegenden Werkstücke besitzen höhere Trennzeiten.

Die Geradengleichung, bekannt aus dem Abschnitt 6.7 „Eingriffswinkel“, für die Versuchsreihe R1 lautet:

$$t = 42,448 \cdot x + 496,33 \quad (32)$$

Ebenfalls bekannt aus dem Abschnitt über den Eingriffswinkel ist die Geradengleichung für die runden Werkstücke aus Versuchsreihe R2:

$$t = 14,391 \cdot x + 620,2 \quad (33)$$

Die Versuchsreihe R3 wird durch ein Polynom dritten Grades angegeben:

$$t = 11,38 \cdot x^3 - 99,744 \cdot x^2 + 375,26 \cdot x + 407,42 \quad (34)$$

Die Daten erlauben qualitative Aussagen, jedoch ist ein direkter mathematischer Vergleich zwischen den genannten Versuchsreihen unter diesen Umständen nicht sinnvoll, da zum einen die Datengrundlage nur sehr begrenzt ist und zum anderen der Einflussfaktor der Geometrie auch auf den Eingriffswinkel und auf die Eingriffslänge Auswirkungen besitzt, die noch weiter erforscht werden müssen.

Zusammenfassend lässt sich aus der Geometrie schlussfolgern, dass unter den in diesen Versuchsreihen gewählten Randbedingungen, runde Werkstücke am effizientesten zu trennen sind. Aufgrund der fehlenden Kante passt sich das Diamantseil optimal an die Oberfläche an und erfährt somit nur eine geringe Schlagkraft. Gerade zu Beginn, wenn sich nur die Kante des Werkstücks im Kontakt mit dem Werkzeug befindet, kommt es zu Spannungsspitzen, die sich sehr negativ auf den Verschleiß des Diamantseils auswirken. Es ist deshalb ratsam, das Diamantseil bei einem Trennprozess immer so anzuordnen, dass die Kontaktflächen maximiert werden. Der Unterschied ist im Vergleich der Versuchsreihe R1 mit R3 deutlich erkennbar. Obwohl sich die Eingriffslänge in Versuchsreihe R3 gegenüber R1 im Mittel nur halbierte, lag der Leistungswert, gegenüber der Versuchsreihe R1, lediglich noch bei 12,5 %. Zusätzlich war die Lebensdauer des Diamantseils erreicht.

Vorarbeiten am Werkstück zur Beseitigung der Kanten sind somit sehr empfehlenswert. Aus Vergleichsgründen wurde in den Versuchsreihen von Beginn an mit konstantem Vorschubdruck gearbeitet. In der Praxis könnte dies allerdings optimiert werden, indem die Störkanten mit einem weitaus weniger hohen Vorschubdruck getrennt werden. Sobald das Diamantseil die Kanten geschnitten hat und sich im vollständigen Eingriff befindet, könnte der Vorschubdruck wieder erhöht werden.

6.9 Spangrößen

Wie bereits in den Ergebnissen der Versuchsreihen beschrieben wurden bei allen Versuchsreihen die jeweils aufgetretenen Spangrößen der angefallenen Späne klassifiziert. Im Anhang sind die Ergebnisse dieser Klassifizierung für alle Versuche aufgelistet.

Abbildung 119 zeigt jeweils den kompletten Verlauf der mittleren Spangröße innerhalb einer Versuchsreihe. Die Mittelung aller Werte für die einzelnen Versuche ist angegeben. Erkennbar ist, dass die Werte im Mittel bei steigender Versuchsanzahl im Trend abfallen. Dies bedeutet, dass der ansteigende Verschleiß am Diamantseil eine Verringerung der mittleren Spangröße zur Folge hat.

Interessant sind die Versuchsreihen R3 und R4, bei denen die Lebensdauer des Diamantseils erreicht worden ist. Beide Versuchsreihen unterschreiten den Wert von $150\ \mu\text{m}$ gegen Ende der jeweiligen Versuchsreihe W8 beziehungsweise W9. Es ist deshalb bei Werkstücken aus Stahl davon auszugehen, dass die Lebensdauer des Diamantseils erreicht worden ist, sobald die mittlere Spangröße der Späne unter $150\ \mu\text{m}$ fällt. Der Wert kleiner $150\ \mu\text{m}$ kann somit als Abbruchkriterium für die Anwendung bei Trennarbeiten für Stähle dienen.

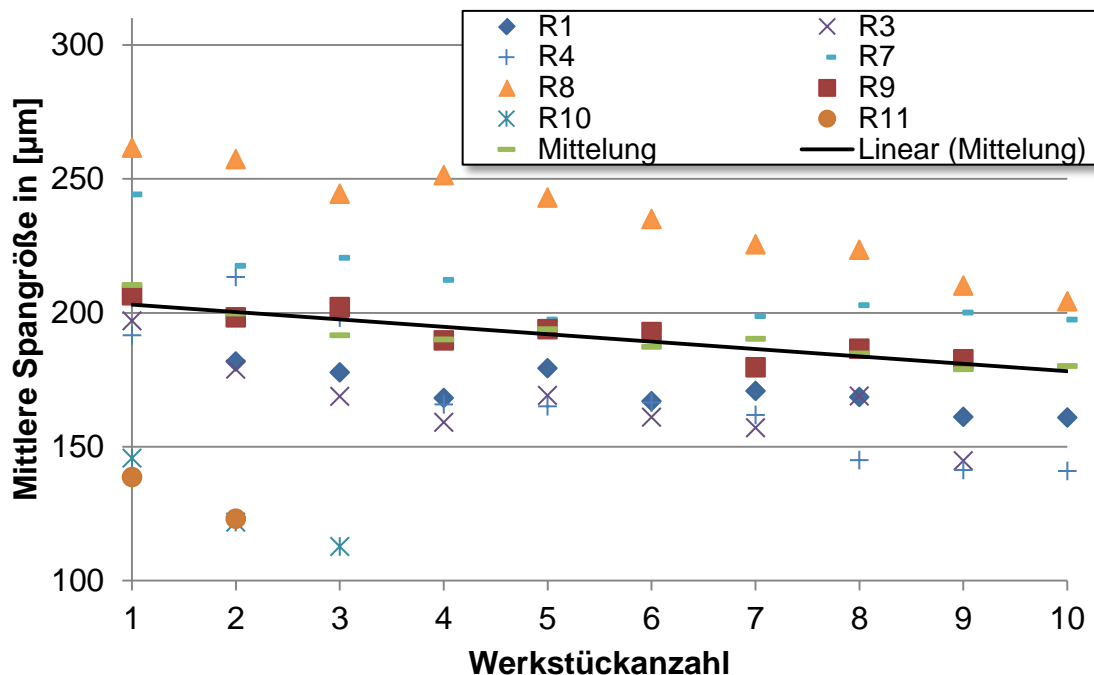


Abbildung 119: Verlauf der mittleren Spangröße

Dieses Abbruchkriterium lässt sich auch bei nichtrostendem Stahl anwenden, da die mittlere Spangröße schon beim jeweils ersten Versuch der Versuchsreihen R10 und R11 ebenfalls den Wert von $150\ \mu\text{m}$ unterschritten hat. Die beiden Reihen mussten schon nach zwei

beziehungsweise drei Versuchen aufgrund der mangelnden Schnittwirkung des Diamantseils abgebrochen werden. Ob es überhaupt möglich ist, einen Wert größer 150 μm als mittlere Spangröße durch veränderte Einflussparameter zu erreichen, muss durch weitere Versuchsreihen gezeigt werden. Versuchsreihe R8 liefert im Vergleich die größten mittleren Spangrößen, weshalb davon ausgegangen werden muss, dass sich eine Erhöhung des Eingriffswinkels und ein größerer Vorschubdruck positiv auf die mittlere Spangröße auswirken. Möglicherweise wird beim Trennen von nichtrostendem Stahl der Effekt ähnlich ausfallen, auch wenn sich die Werkstoffe im Trennverhalten voneinander unterscheiden.

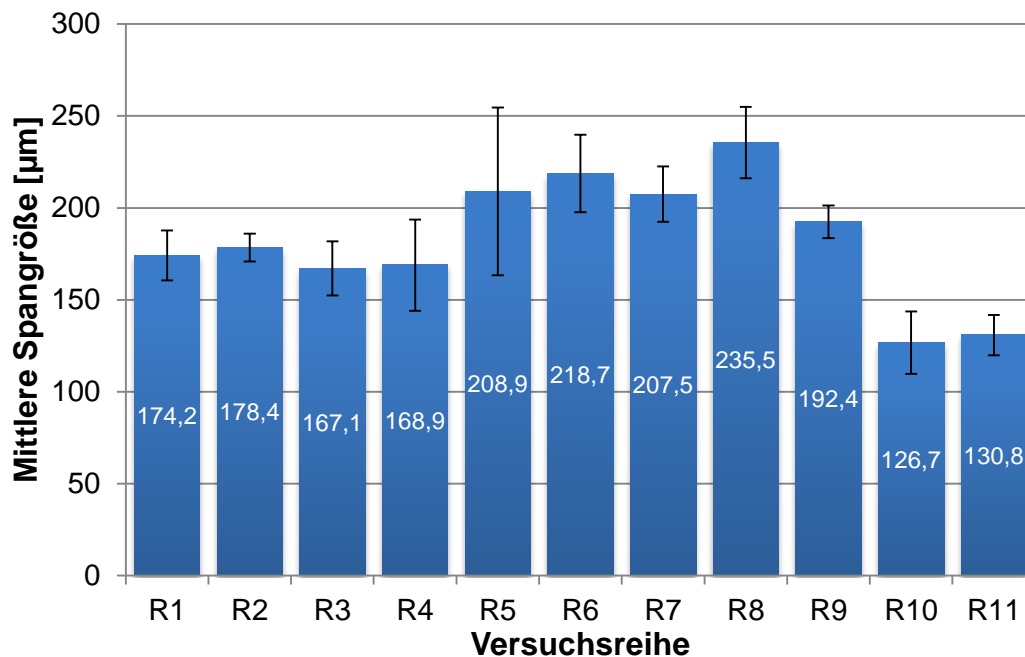


Abbildung 120: Mittlere Spangröße der Versuchsreihen

In Abbildung 120 sind die mittleren Spangrößen für die jeweiligen Versuchsreihen mit ihrer zugehörigen Standardabweichung dargestellt. Wie zuvor beschrieben, erzielte die Versuchsreihe R8 die größte mittlere Spangröße.

Der Vergleich von Versuchsreihe R1 mit R6 zeigt, dass bei einem größeren Eingriffswinkel die mittlere Spangröße ebenfalls ansteigt. Ausgehend von 100 % für Versuchsreihe R1 liegt der Wert der Versuchsreihe R6 bei 126 %. Der erhöhte Eingriffswinkel resultiert also in einem Anstieg der mittleren Spangröße um 26 %. Durch den Vergleich der Versuchsreihe R6 mit R8, die zusätzlich unter einem erhöhten Vorschubdruck getrennt wurde, zeigt sich, dass sich die mittlere Spangröße um weitere 9 % auf insgesamt 135 % erhöht hat.

Für die runden Werkstücke der Versuchsreihen R2 und R7 zeigt sich, dass sich die mittlere Spangröße bei einem größeren Eingriffswinkel von 178,4 μm auf 207,5 μm erhöht, was einem Anstieg von 16 % entspricht.

Abbildung 121 zeigt die mittlere Spangröße aufgetragen über der mittleren Gesamtleistung der jeweiligen Versuchsreihe. Erkennbar ist eine Korrelation zwischen den beiden Werten. Je größer die mittlere Gesamtleistung, desto größer war auch die mittlere Spangröße. So besitzt die Versuchsreihe R8 bei der höchsten mittleren Gesamtleistung die höchste mittlere Spangröße. Gleichmaßen besitzt die Versuchsreihe R6 mit der zweithöchsten mittleren Gesamtleistung die zweithöchste mittlere Spangröße. Aus dieser Beobachtung folgt; je höher

die erzielte mittlere Spangröße, desto höher die Schnittleistung. Je höher die Schnittleistung, desto größer sind die zu erwartenden mittleren Spangrößen.

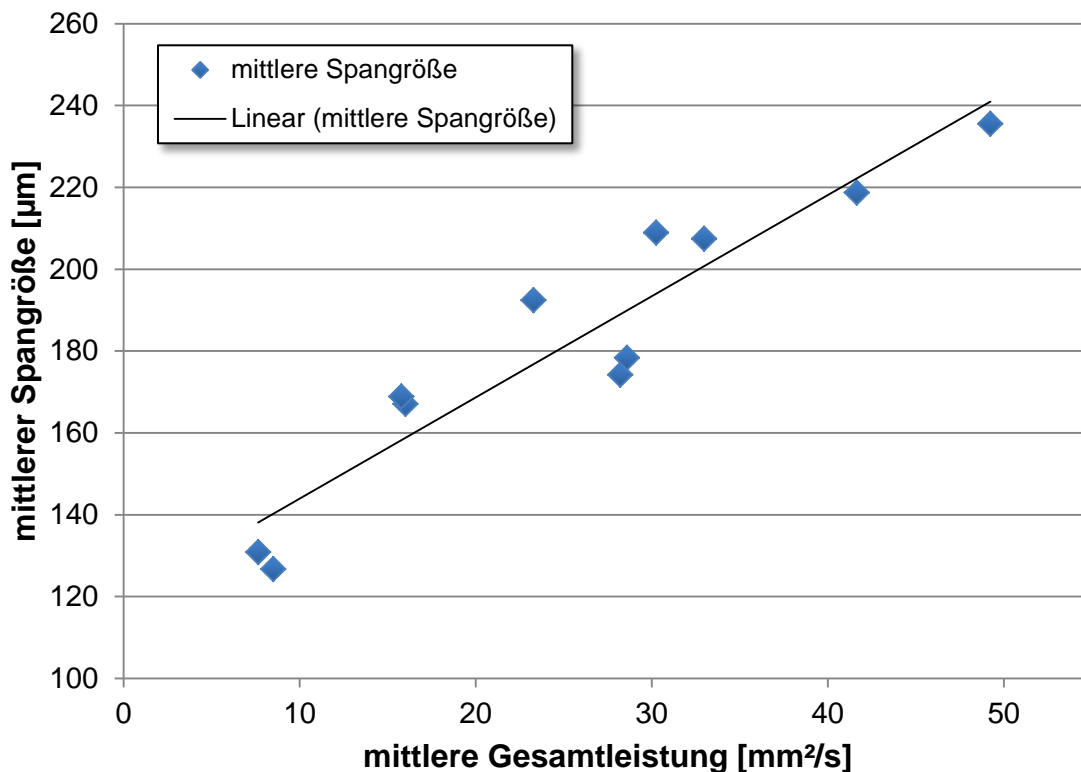


Abbildung 121: mittlere Spangröße aufgetragen über der mittleren Gesamtleistung für jede Versuchsreihe

Zusammenfassend lassen sich für die Spangrößen folgende Beobachtungen schließen. Mit steigender Trenndauer beziehungsweise steigender Fläche verringert sich die mittlere Spangröße aufgrund des Verschleißes am Diamantseil. Als Abbruchkriterium für einen Trennprozess von Stahl kann eine mittlere Spangröße kleiner 150 µm angesehen werden. Je größer die erzielte Schnittleistung, desto größer fallen die Spangrößen der Späne aus. So kann beispielsweise anhand des angefallenen Spans der Leistungsfaktor des Trennprozesses bewertet werden.

6.10 Modell

6.10.1 Modellerstellung

Aus den zuvor dargestellten Vergleichen wurde der Einfluss der einzelnen Parameter auf den Trennprozess erarbeitet. Anhand dieser Gegenüberstellungen der Versuchsreihen konnten Gleichungen erzeugt werden, die die Veränderung für einen einzelnen Einflussparameter abbilden. Durch Zusammenfassen dieser Gleichungen ergibt sich ein Modell, mit dem Vorhersagen zur Trennzeit und zum Verschleiß ermöglicht werden. Das Modell gilt jeweils nur für eine bestimmte Geometrie, da ein Vergleich zwischen den Geometrien aufgrund der Datenlage nicht möglich ist. Der Grundaufbau des Trennzeitmodells lautet wie folgt:

$$t_{Trennzeit} = f(v_c, p_f, \alpha, S, W, M) \quad (35)$$

Die in der Formel genutzten Faktoren sind in Tabelle 15 aufgelistet:

Tabelle 15: Faktoren zur Modellerstellung

v_c	Schnittgeschwindigkeit
p_f	Vorschubdruck
α	Eingriffswinkel
S	Geometrie
W	Werkzeugzustand
M	zu trennendes Material

Der Faktor S für die Geometrie ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht vollständig ermittelt, da die Datengrundlage diesbezüglich noch nicht vollständig geklärt ist. Er ist ebenfalls von der Eingriffslänge abhängig, die sich wiederum mit der Trennzeit und dem Winkelverlauf ändert.

Der Faktor W gibt den Werkzeugzustand beziehungsweise die Werkzeugart an. Da die Versuche alle mit einem galvanisch belegten und jeweils neuwertigen Diamantseil durchgeführt wurden, sind nur Aussagen unter diesen Bedingungen möglich. Durch weitere Versuchsdaten mit anderen Diamantseilen wäre eine Modifikation des Faktors W möglich.

Gleiches gilt für den Faktor M , der für das Material steht. Es wurde vergüteter Baustahl mit höherer Streckgrenze untersucht, andere Materialien könnten aber ebenfalls über diesen Faktor M in das Modell eingebracht werden.

Aus der Differenz für die Schnittgeschwindigkeit von 20 m/s in Versuchsreihe R1 mit der Schnittgeschwindigkeit von 15 m/s aus Versuchsreihe R9 lässt sich folgende Gleichung aufstellen:

$$\Delta t_{v_c(5\frac{m}{s})} = -7,265 \cdot x + 200,2 \quad (36)$$

Da die Schnittgeschwindigkeit nur für die beiden Werte 15 m/s beziehungsweise 20 m/s untersucht wurde, sind Aussagen zu anderen Schnittgeschwindigkeiten nicht möglich, da es nicht bekannt ist, ob der Verlauf als linear angesehen werden kann.

Die Erhöhung des Vorschubdrucks p_f von 0,15 MPa auf 0,2 MPa kann mit dieser Formel (23) angegeben werden:

$$\Delta t_{p_f(0,05\text{ MPa})} = -3,752 \cdot x - 54,66 \quad (23)$$

Um die Formel zu erhalten, die den Einstellparameter des Eingriffswinkels wiedergibt, werden die beiden Gleichungen für die Versuchsreihen R1 und R6 subtrahiert. So entsteht die Formel, die die Erhöhung des Eingriffswinkels abbildet. Diese Gerade lautet für rechteckige, quer liegende Werkstücke:

$$\Delta t_{\alpha(5^\circ),\text{rechteckig quer liegend}} = 27,454 \cdot x + 94,6 \quad (37)$$

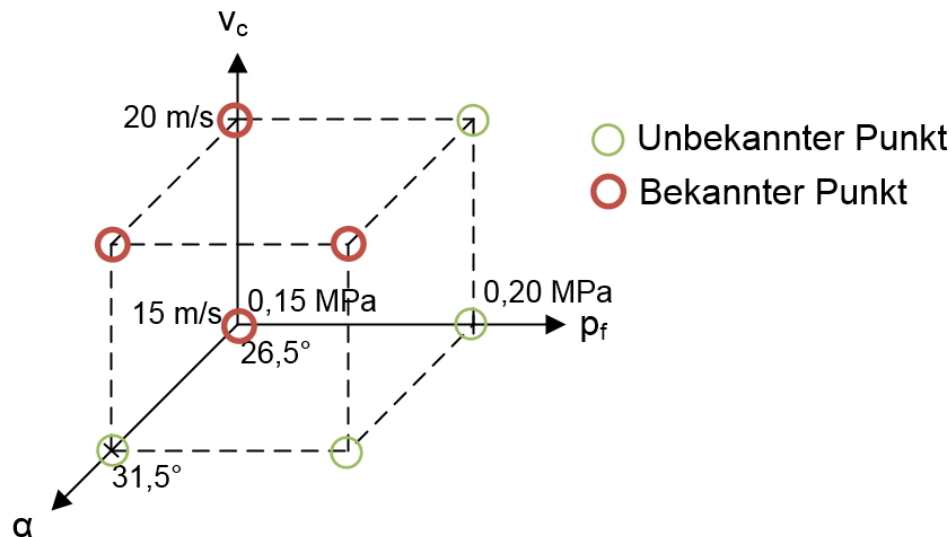


Abbildung 122: Übersicht über die möglichen Variationen

Tabelle 16: Auflistung der Trennzeitformel für alle Variationen

Bekannt	v_c	p_f	α	$t_{ermittelt}$	$t_{theoretisch}$
ja	15 m/s	0,15 MPa	26,5°	$t = 35,183 \cdot x + 696,53$	
nein	15 m/s	0,15 MPa	31,5°		$t = 7,729 \cdot x + 601,93$
nein	15 m/s	0,20 MPa	26,5°		$t = 31,431 \cdot x + 641,87$
nein	15 m/s	0,20 MPa	31,5°		$t = 3,977 \cdot x + 547$
ja	20 m/s	0,15 MPa	26,5°	$t = 42,448 \cdot x + 496,33$	
ja	20 m/s	0,15 MPa	31,5°	$t = 14,994 \cdot x + 401,73$	
nein	20 m/s	0,20 MPa	26,5°		$t = 38,696 \cdot x + 441,67$
ja	20 m/s	0,20 MPa	31,5°	$t = 11,242 \cdot x + 347,07$	

Anhand dieser Formeln lassen sich die Trennzeiten für alle Variationen mit diesen Randbedingungen ableiten. In Abbildung 122 sind alle möglichen Kombinationen, die sich durch die Variation der drei Faktoren ergeben, dargestellt. Da jeweils der Unterschied auf der jeweiligen Achse bekannt ist, können die fehlenden vier Zustände modelliert werden. Da pro Achse nur die beiden Randpunkte bekannt sind, kann keine Aussage darüber getroffen werden, wie sich der Faktor zwischen oder außerhalb dieser Randpunkte verhält. Das Modell geht davon aus, dass keine Abhängigkeit zwischen den einzelnen Faktoren existiert.

Um die theoretische Trennzeit eines unbekanntem Versuchs zu modellieren, wird die Vorgehensweise anhand des folgenden Beispiels erläutert. Theoretisch ermittelt werden soll der Trennzeitverlauf für folgende Faktoren: $v_c = 20 \text{ m/s}$, $p_f = 0,20 \text{ MPa}$ und $\alpha = 26,5^\circ$. Anhand einer ähnlichen, bekannten Versuchsreihe kann die theoretische Trennzeit berechnet werden. Als ähnlich bekannte Versuchsreihe wird, bezogen auf dieses Beispiel, diejenige mit den Faktoren $v_c = 20 \text{ m/s}$, $p_f = 0,20 \text{ MPa}$ und $\alpha = 31,5^\circ$ gewählt. Wie sich zeigt, unterscheiden sie sich nur im Eingriffswinkel α . Bei einer Erhöhung des Eingriffswinkels von $26,5^\circ$ auf $31,5^\circ$ muss folglich die Formel $\Delta t_{\alpha(5^\circ),rq} = 27,454 \cdot x + 94,6$ mit der bekannten Formel addiert werden:

$$t_{th;20\frac{m}{s};0,2MPa;26,5^\circ} = t_{20\frac{m}{s};0,2MPa;31,5^\circ} + \Delta t_{\alpha(5^\circ),rq} \quad (38)$$

Daraus ergibt sich:

$$t_{th;20\frac{m}{s};0,2MPa;26,5^\circ} = (11,242 \cdot x + 347,07) + (27,454 \cdot x + 94,6) \quad (39)$$

$$t_{th;20\frac{m}{s};0,2MPa;26,5^\circ} = 38,696 \cdot x + 441,67 \quad (40)$$

Die anderen fehlenden Varianten werden wie nachfolgend aufgezeigt berechnet.

Für den unbekanntem Punkt $v_c = 15 \text{ m/s}$, $p_f = 0,15 \text{ MPa}$ und $\alpha = 31,5^\circ$ gilt:

$$t_{th;15\frac{m}{s};0,15MPa;31,5^\circ} = t_{15\frac{m}{s};0,15MPa;26,5^\circ} - \Delta t_{\alpha(5^\circ),rq} \quad (41)$$

$$t_{th;15\frac{m}{s};0,15MPa;31,5^\circ} = 7,729 \cdot x + 601,93 \quad (42)$$

Für den unbekanntem Punkt $v_c = 15 \text{ m/s}$, $p_f = 0,2 \text{ MPa}$ und $\alpha = 26,5^\circ$ gilt:

$$t_{th;15\frac{m}{s};0,2MPa;26,5^\circ} = t_{15\frac{m}{s};0,15MPa;26,5^\circ} + \Delta t_{p_f(0,05 \text{ MPa})} \quad (43)$$

$$t_{th;15\frac{m}{s};0,2MPa;26,5^\circ} = 31,431 \cdot x + 641,87 \quad (44)$$

Für den unbekanntem Punkt $v_c = 15 \text{ m/s}$, $p_f = 0,2 \text{ MPa}$ und $\alpha = 31,5^\circ$ gilt:

$$t_{th;15\frac{m}{s};0,2MPa;31,5^\circ} = t_{15\frac{m}{s};0,15MPa;26,5^\circ} + \Delta t_{p_f(0,05 \text{ MPa})} - \Delta t_{\alpha(5^\circ),rq} \quad (45)$$

$$t_{th;15\frac{m}{s};0,2MPa;31,5^\circ} = 3,977 \cdot x + 547 \quad (46)$$

Das Modell ist durch weitere Versuchsreihen ausbaubar. Bisher wurden pro Parameter nur zwei Zustände untersucht, weshalb keine Aussagen darüber getroffen werden können, ob sich der Parameter beispielsweise linear verhält. Würde für jeden Parameter noch einmal eine Versuchsreihe durchgeführt werden, so wäre es möglich, mit sieben durchgeführten Versuchsreihen 21 weitere vorherzusagen.

Das Modell gilt nur für rechteckige, quer liegende Werkstücke, kann aber genau in der Form auch für runde Werkstücke aufgestellt werden. Die beiden in dieser Arbeit durchgeführten Versuchsreihen mit runden Werkstücken lassen noch keine weiteren Vorhersagen zu, können aber als Basis für ein Modell mit runden Werkstücken verwendet werden.

6.10.2 Verifikation

Das aufgestellte Modell wurde anhand einer Versuchsreihe mit rechteckigen, quer liegenden Werkstücken verifiziert. Es wurde eine Versuchsreihe mit einer Konstellation von zwei unbekanntem Parametern gewählt, weshalb für die theoretische Vorhersage die Kombination von zwei Parametern berechnet werden muss.

Die Parameter lauten: $v_c = 20 \text{ m/s}$, $p_f = 0,20 \text{ MPa}$ und $\alpha = 26,5^\circ$. Die theoretische Trennzeit ergibt sich somit nach der Modellformel zu:

$$t_{th;20\frac{m}{s};0,2MPa;26,5^\circ} = 38,696 \cdot x + 441,67 \quad (47)$$

Die Verifikations-Versuchsreihe wurde auf drei Versuche beschränkt, da hierdurch ein ausreichendes Bild auf die Gültigkeit des Modells erlangt werden konnte.

Abbildung 123 zeigt die ermittelten Werte aus dieser Versuchsreihe im Vergleich mit der Trennzeitvorhersage aus dem Modell. Die Werte weichen 9 Sekunden für W1, 2 Sekunden für W2 und 8 Sekunden für W3 voneinander ab. Dies sind akzeptable Abweichungen, die sich beispielsweise aus der Ungenauigkeit in der Einstellung des Vorschubdrucks ergeben. Die Abweichung beträgt im Mittel weniger als 1 %.

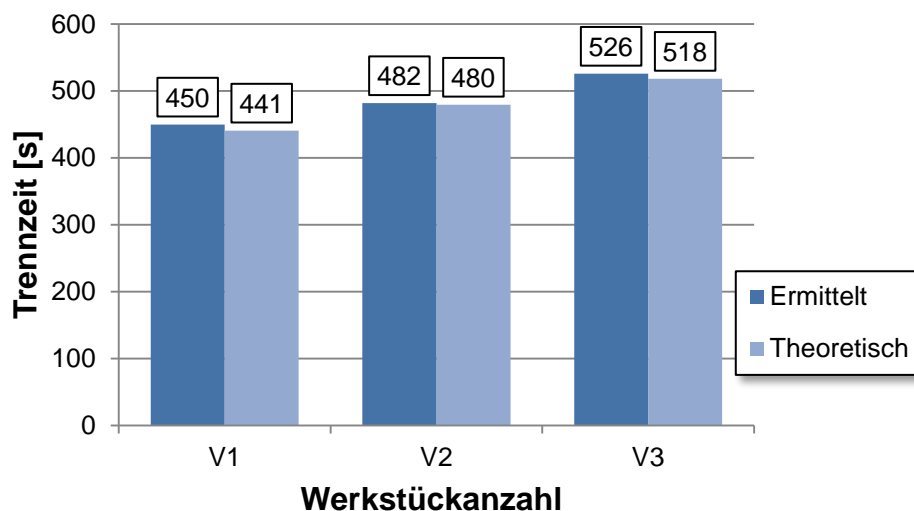


Abbildung 123: Vergleich der theoretischen Trennzeitvorhersage und der tatsächlich ermittelten Trennzeit für die Verifikations-Versuchsreihe

Die nachträglich praktisch durchgeführte Versuchsreihe hat gezeigt, dass die Gültigkeit des Modells in der jetzigen Form gewährleistet ist und somit für Vorhersagen zur Trennzeitbestimmung genutzt werden kann. Es ist somit ebenfalls möglich, das Modell als Basis zu verwenden und durch weitere Versuche auszubauen.

7 Bewertung

Aus den gewonnenen Ergebnissen lassen sich für die Praxis nutzbare Erkenntnisse gewinnen. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die Erkenntnisse nur für die Randbedingungen, unter denen sie durchgeführt wurden, in dieser Form anwendbar und übertragbar sind. Es hat sich gezeigt, dass unter den gewählten Rahmenbedingungen eine Absenkung der Schnittgeschwindigkeit zu einem Anstieg des Leistungsfaktors geführt hat. Der Leistungsfaktor ist in dieser Arbeit definiert als Quotient der Gesamtleistung der Versuchsreihe durch die mittlere Abnahme der Trennleistung innerhalb der Versuchsreihe

Die Geschwindigkeit wurde von 20 m/s auf 15 m/s herabgesenkt, was zu einer Verdopplung des Leistungsfaktors führte. Zwar sind die Trennzeiten höher und deshalb auch die Leistung geringer, jedoch wird durch diese Maßnahme der Verschleiß halbiert. Dies zeigt für die durchgeführten Versuchsreihen, dass sich ein Trennprozess mit abgesenkter Schnittgeschwindigkeit schonender auf das Diamantseil auswirkt. Ist also genügend Zeit für den Trennprozess vorhanden, so sollte dieser aus Verschleißgründen mit abgesenkter Schnittgeschwindigkeit durchgeführt werden. Bei einer wirtschaftlichen Gesamtbetrachtung müssen die Mehrkosten für Personal, hervorgerufen durch die längere Trennzeit, in Relation zu der Ersparnis an Diamantseilen durch den geringeren Verschleiß gesetzt werden.

Die Verdrillung des Diamantseils ist, zumindest in der Anordnung des Versuchstandes, als nicht notwendig einzustufen, da sie keinen positiven Effekt auf den Trennprozess hat. Möglicherweise entsteht während des Trennprozesses bei der gewählten Anordnung eine Eigenrotation, die eine zusätzliche Verdrillung überflüssig macht. Es ist jedoch auch festzuhalten, dass eine Verdrillung des Diamantseils sich nicht negativ auf den Trennprozess auswirkt. Ob sich der zusätzliche Aufwand der Verdrillung des Diamantseils in der Praxis als unnötig erweist, kann nicht restlos geklärt werden, allerdings hat es den Anschein, dass die Verdrillung überflüssig ist.

Bei einer Anhebung des Vorschubdrucks ergeben sich geringere Trennzeiten, die wiederum in höheren Trennleistungen resultieren. Bei einem Anstieg von 0,15 MPa auf 0,2 MPa blieb der Verschleiß annähernd gleich, jedoch stieg der Leistungsfaktor an. Solange der Verschleiß nicht relevant ist, ist deshalb davon auszugehen, dass der Trennprozess immer mit möglichst hohem Vorschubdruck durchgeführt werden sollte. Sollte sich der Verschleiß ändern, muss der Trennprozess neu bewertet werden. Der Vorschubdruck ist natürlich von der eingesetzten Maschine und der zur Verfügung stehenden Technik abhängig. Ebenso muss beachtet werden, dass bei steigendem Vorschubdruck das Diamantseil mehr belastet wird und es somit schneller zu Seilrissen kommen kann. Inwiefern die Häufigkeit eines Seilrisses mit zunehmendem Vorschubdruck zunimmt, ist nicht geklärt und könnte, um genauere Aussagen diesbezüglich zu ermöglichen, im Rahmen einer anderen Aufgabenstellung untersucht werden.

Es hat sich gezeigt, dass der Eingriffswinkel bei unterschiedlicher Geometrie verschiedene Auswirkungen hat. Das Verhalten von rechteckigen, quer liegenden und runden Werkstücken bei einem vergrößerten Eingriffswinkel ist nicht direkt vergleichbar. Bei rechteckigen, quer liegenden Werkstücken verringert sich der Verschleiß am Diamantseil während sich der Verschleiß bei runden Werkstücken erhöht. Des Weiteren ist festzuhalten, dass sich die Leistung bei beiden Versuchsreihen, vor allem aber bei rechteckigen, quer liegenden Werkstücken signifikant erhöht, je größer der Eingriffswinkel ist. Eine relativ

geringe Winkeländerung von 5° wirkt sich signifikant auf den Trennprozess aus, sodass die Leistungsfaktor bei den rechteckigen, quer liegenden Werkstücken um 78 % ansteigt. Bei den runden Werkstücken kommt es zu einer nahezu gleichbleibenden Effizienz. Bei kantigen Geometrien ist es vorteilhaft, einen möglichst großen Eingriffswinkel zu wählen, da das Diamantseil bei Kanten nicht komplett in der theoretisch möglichen maximalen Eingriffslänge verläuft. Bei runden Geometrien ist der Kanteneinfluss nicht gegeben, da sich das Diamantseil immer optimal an das Werkstück anlegt, sodass bei einer Erhöhung des Eingriffswinkels die Trennzeit reduziert, der Verschleiß jedoch nicht erhöht wird. Da jedoch die Effizienz annähernd gleich bleibt, ist es zu empfehlen, runde Werkstücke ebenfalls unter einem größtmöglichen Eingriffswinkel zu trennen.

Die Anordnung des Trennprozesses und damit die Festlegung des Schnittverlaufs des zu trennenden Querschnitts stellt die größte Einflussmöglichkeit auf den Trennprozess dar. Es hat sich gezeigt, dass runde Werkstücke aufgrund der fehlenden Kante und dem dadurch zu Beginn des Trennprozesses immer optimal anliegenden Diamantseil, unter den in dieser Arbeit ermittelten, höchsten Leistungsfaktoren getrennt werden konnten. Es ist deshalb empfehlenswert als vorbereitende Maßnahme Kanten an Werkstücken für den Trennprozess so gut wie möglich vorher zu entfernen. Sind Kanten nicht zu vermeiden, so sollte der Vorschubdruck reduziert werden, sobald an diesen Stellen der Abtrag erfolgt. Da sich nur wenige Diamantsegmente im Eingriff befinden, kann so einer Überlastung entgegengewirkt werden. Dadurch wird die Schlagwirkung auf die Diamantsegmente an der Kante reduziert, was sich positiv auf das Verschleißverhalten auswirkt.

Gerade beim Vergleich von rechteckigen, quer liegenden Werkstücken mit den rechteckigen, hochkant stehenden Werkstücken zeigt sich der Einfluss der Eingriffslänge sehr deutlich, da sich diese durch die Drehung halbiert. Diese Halbierung der Eingriffslänge resultiert jedoch darin, dass das Diamantseil schon nach nur neun Versuchen seine Standzeit erreicht hat, während sie zum gleichen Zeitpunkt bei den rechteckigen, quer liegenden Werkstücken nur knapp über der Anfangstrennzeit der rechteckigen, hochkant stehenden liegt. Es ist deshalb darauf zu achten, eine Anordnung zu wählen, mit der das Werkstück mit größtmöglicher Eingriffslänge getrennt werden kann.

Die Versuchsreihen, in denen nichtrostender Stahl getrennt wurde, zeigen, dass es nicht sehr sinnvoll ist, diesen Werkstoff mit einer Seilsäge zu trennen. Zwar ist es unter hohem Kosteneinsatz möglich, sicherlich aber im Vergleich mit anderen Verfahren als nicht ökonomisch anzusehen.

Die Auswertung der mittleren Spangröße der angefallenen Späne zeigt eine deutliche Abnahme bei steigender Trennzeit. Als Kriterium für einen Abbruch des Trennprozesses von Stahl kann, resultierend aus den Messergebnissen, eine mittlere Spangröße kleiner $150\ \mu\text{m}$ angesehen werden. Sobald dieses Abbruchkriterium unterschritten wird, sollte das Diamantseil getauscht werden. Ob sich der Aufwand für eine Ermittlung der mittleren Spangröße lohnt, hängt natürlich von der Größe des Trennvorhabens ab und sollte immer situationsbezogen entschieden werden. Ebenfalls wurde gezeigt, dass die mittlere Spangröße mit der mittleren Leistung korreliert. Je größer die erzielte Schnittleistung, desto größer fallen die produzierten Spangrößen der Späne aus. So kann beispielsweise anhand der angefallenen Späne der Trennprozess bewertet werden, ob dieser mit einer hohen Schnittleistung durchgeführt wurde, beziehungsweise solange der Trennprozess noch nicht abgeschlossen ist, wird.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Gemäß der Zielstellung wurde ein Versuchsstand aufgebaut, an dem für das umschlingende Seilsägeverfahren Untersuchungen unter Variation der Einflussgrößen durchgeführt wurden. Ziel der Arbeit war es, die Auswirkungen der verschiedenen Einflussgrößen beschreiben zu können. Die vorliegende Arbeit trägt zum Verständnis bei, wie sich die verschiedenen Einstellungen bei einem Trennprozess mit einer Seilsäge für das in der Praxis übliche umschlingende Verfahren auswirken. Neben den Auswirkungen auf die Schnittleistung wurde auch die Wirkung auf den Verschleiß am Diamantseil untersucht, um so effiziente Schnittparameter zu erkennen.

Nach dem Aufbau der Versuchseinrichtung und Voruntersuchungen wurden die verschiedenen Einflussparameter ermittelt. Aufgrund der hohen Abhängigkeit zwischen den Einflussparametern wurden diese anhand einer Einflussmatrix bewertet. Aus den Resultaten dieser Bewertung und den Erkenntnissen aus den Vorversuchen wurden die Randbedingungen wie beispielsweise Werkstückgröße festgelegt und ein Versuchsplan erstellt.

Der Versuchsplan unterteilt sich in insgesamt elf Versuchsreihen, in denen je nach Diamantseilzustand bis zu elf Versuche durchgeführt wurden. In vier Versuchsreihen war die Standzeit des Diamantseils schon vor Ablauf der elf Versuche erreicht worden. In jeder Versuchsreihe wurde nur ein Einflussparameter geändert, die restlichen Einflussparameter blieben unverändert. Diese Änderung von nur einem Einflussparameter zeigt im Vergleich mit einer anderen Versuchsreihe ihre Auswirkung auf den Trennprozess.

Variiert wurden die Diamantseilgeschwindigkeit, der Vorschubdruck, der Eingriffswinkel, die Geometrie bei gleichbleibender Schnittfläche, das Werkstückmaterial und die Verdrillung des Diamantseils. Durch die Variation dieser Einflussparameter konnte deren Bedeutung auf die Leistung des Trennprozesses und auch auf das Verschleißverhalten des Diamantseils ermittelt werden.

Durch die Klassifizierung der Spangrößen der angefallenen Späne konnte gezeigt werden, dass eine höhere Schnittleistung zu einer Vergrößerung der mittleren Spangröße führt. Aus diesem Umstand wurde ein Abbruchkriterium bei einer Spangröße kleiner 150 µm festgelegt. Sobald die mittlere Spangröße diesen Wert unterschreitet, verläuft der Trennprozess ineffektiv und sollte abgebrochen beziehungsweise das Diamantseil getauscht werden.

Anhand der ermittelten Daten aus den durchgeführten Versuchsreihen wurde ein Modell für rechteckige, quer liegende Werkstücke aufgestellt, das Vorhersagen zur Trennzeit ermöglicht. Das entwickelte Modell wurde verifiziert, indem eine aus dem Modell hervorgegangene Prognose mit einer in der Praxis durchgeführten Versuchsreihe verglichen wurde.

Zusätzlich wurden weitere Untersuchungen durchgeführt, um das Verständnis für die Funktionsweise der Seilsäge zu erhöhen. So wurden partielle Werkstücke getrennt, um den Kraftverlauf lokal im Werkstück besser deuten zu können. Es wurde versucht, Schnitte an einer Tauchseilsäge durchzuführen, um den großen Nachteil der in sich abhängigen

Parameter beim umschlingenden Verfahren auszugleichen. Dies ermöglicht eine bessere Isolation der Einflussparameter. Des Weiteren konnte durch einen zusätzlichen Versuchsaufbau nachgewiesen werden, dass sich die Kraft, die das Diamantseil auf das Werkstück überträgt, auf dessen Ausgangsseite leicht gegenüber der eingestellten Vorschubkraft erhöht, während sie auf der Eintrittsseite des Werkstücks, zumindest zu Beginn, gerade einmal ein Drittel der eingestellten Vorschubkraft beträgt. Ein weiterer Spezialversuch galt der zeitlichen Änderung des Eingriffswinkels bei unterschiedlicher Geometrie. Ebenfalls wurde der Verlauf für die Eingriffslänge bei unterschiedlicher Geometrie nachgebildet.

Im Anschluss daran wurden in der Bewertung Empfehlungen für die Praxis beschrieben, die aus den in der Arbeit durchgeführten Untersuchungen resultieren, um so den Trennprozess mit einer Seilsäge effizienter durchführen zu können.

8.2 Ausblick

Die Seilsägetechnologie besitzt Optimierungspotential. Zum einen gibt es, wie diese Arbeit gezeigt hat, noch Möglichkeiten an der Anordnung des Seils um das Werkstück. Zum anderen könnten Untersuchungen am Werkzeug dazu beitragen, dass Trennprozesse effizienter durchgeführt werden. In folgenden Arbeiten kann auf den gemachten Untersuchungen aufgebaut werden, um so eine größere Datenbasis für die einzelnen Einflussparameter zu erhalten. Durch die größere Datenbasis könnte das in dieser Arbeit entwickelte Modell erweitert werden, mit dem sich der Trennprozess im umschlingenden Verfahren besser beschreiben lassen würde.

Beispielsweise könnten weitere Materialien untersucht werden, da der Seilsäge diesbezüglich keine Grenzen gesetzt sind. Bisher wurde als Material nur vergüteter Baustahl mit höherer Streckgrenze und nichtrostender Stahl untersucht, was noch durch andere Materialzusammensetzungen ergänzt werden könnte. Weitere Untersuchungen könnten auch für den Faktor "S", der für die Geometrie steht, durchgeführt werden. Dieser ist ebenfalls von der Eingriffslänge abhängig, die sich wiederum mit der Trennzeit und dem Winkelverlauf ändert und deshalb weiterführend untersucht werden könnte.

Durch Ermittlung des Faktors "W", der den Werkzeugzustand beziehungsweise die Werkzeugart angibt, könnte das Modell weiter verfeinert werden. Da in dieser Arbeit die Versuche alle mit einem galvanisch belegten und jeweils neuwertigen Diamantseil durchgeführt wurden sind nur Aussagen unter diesen Bedingungen möglich. Beispielsweise könnten auch Seile mit gesinterten Diamantsegmenten untersucht werden. Durch weitere Versuchsdaten mit anderen Diamantseilen wäre somit eine Anpassung des Modells durch den Faktors "W" möglich.

Die in dieser Arbeit begonnene Untersuchung mit einer Tauchseilsäge, um den Einflussparameter der Geometrie vom Eingriffswinkel zu entkoppeln, könnte weitergeführt werden, was zur Folge hätte, dass entsprechende geometrieunabhängige Kennwerte ermittelt werden können, die das Verständnis der Seilsägetechnologie weiter erhöhen würden. Gerade beim Trennen von Stahl mit der Seilsäge bietet sich diesbezüglich noch hohes Optimierungspotenzial.

Desweiteren haben die zusätzlichen Versuche, die in dieser Arbeit durchgeführt wurden gezeigt, dass in den verschiedenen Teilbereichen weiterer Forschungsbedarf besteht.

Aus den Untersuchungen mit einer partiellen, rechteckigen Werkstückunterteilung wurde gezeigt, wie sich der zeitliche Kraftverlauf in einem Werkstück darstellt. Die Untersuchungen könnten ebenfalls an einem runden Werkstück durchgeführt werden, was bessere Rückschlüsse auf den Einfluss der Geometrie zur Folge hätte, insbesondere dem Einfluss der Werkstückkanten.

Die Versuche mit der Tauchseilsäge haben gezeigt, dass weiterführende Untersuchungen in diesem Bereich für das Verständnis der Einflussparameter sehr hilfreich wären. Das umschlingende Verfahren, welches in der Arbeit zur Anwendung kam, besitzt den großen Nachteil, dass sich die Einflussparameter stetig ändern und sich diese nicht vollständig isolieren lassen. Als größtes Hindernis wird der nicht konstant bleibende Eingriffswinkel angesehen. Der Eingriffswinkel ist immer zeitabhängig. Dieser Nachteil könnte durch den Einsatz des Tiefenschnittverfahrens ausgeglichen werden und somit könnte der Einfluss des Eingriffswinkels grundlegend untersucht werden.

Die Versuche mit dem zeitlichen Verlauf des Eingriffswinkels haben gezeigt, dass der Winkelverlauf bei rechteckigen, quer liegenden Werkstücken keine exakten Rückschlüsse auf die Trennzeit von Kanten zulässt. Durch eine genauere kapazitive Sensorik, die direkt an dem Werkstück befestigt wird könnte womöglich festgestellt werden, zu welchem genauen Zeitpunkt die Kante überwunden wird. Dies ist jedoch nur mit sehr hohem Aufwand durchzuführen, da das Werkstück komplett unter Wasser liegt. Damit wäre der Kanteneinfluss genau eingegrenzt.

Die theoretischen Berechnungen erlauben es annäherungsweise die verschiedenen Eingriffslängen bei verschiedenen Geometrien zu berechnen. Damit wird es möglich den Verlauf des bereits getrennten Flächeninhaltes bei unterschiedlicher Geometrie zu errechnen. Weitere Untersuchungen könnten, mit Fokus auf weitere unterschiedliche Rollenabstände sowie unterschiedliche Abstände von Umlenkrollen zu Werkstück durchgeführt werden, um noch genauere Berechnungen zu ermöglichen.

Formelzeichen

Formelzeichen	SI-Einheit	Bedeutung
A_S	mm^2	Querschnittsfläche des Diamantseils
b_s	mm	Schnittbreite
d	-	Laufparameter
e_c	J/mm^3	Spezifische Schleifenergie
F_a	N	Seitenkraft
F_n	N	Normalkraft
F_t	N	Tangentialkraft
F_z	N	Zentrifugalkraft
h_{cu}	μm	Einzelkornspannungsdicke
l_e	mm	Eingriffslänge des Diamantseil im Werkstück
l_s	mm	Länge des Diamantsegments
l_t	mm	Abstand zwischen Diamantsegmenten
P_C	Nm/s	Umgesetzte Leistung
P_{fg}	-	Arbeitsebene
q_t	$\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$	Gesamter Wärmestrom
q_s	$\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$	Wärmestrom der Schneidkörper
q_w	$\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$	Wärmestrom des Werkstücks
q_{span}	$\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$	Wärmestrom der Späne
q_{kss}	$\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$	Wärmestrom des Kühlmittelschmierstoffs
Q_w	mm^3/s	Zeitspanvolumen
Q'_w	mm^2/s	Zeitspanvolumen bezogen auf Schnittbreite
$R_{p0,2}$	MPa	Streckgrenze
R_m	MPa	Zugfestigkeit
v_c	m/s	Schnittgeschwindigkeit des Diamantseils
v_f	mm/s	Vorschubbewegung
v_e	mm/s	Wirkbewegung
λ	-	Segmentierung der Diamantsegmente
α	°	Eingriffswinkel von Diamantseil mit Werkstück
M	-	Reibungskoeffizient
P	kg/dm^3	Dichte
Σ	N/mm^2	Seilspannung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Trennen und Einteilung der Verfahren (auszugsweise) nach DIN 8580 [11]	5
Abbildung 2: Längsschleifen [15].....	8
Abbildung 3: Seiten-Bandschleifen [14].....	8
Abbildung 4: Funktionsweise einer Seilsäge.....	9
Abbildung 5: Thermografieaufnahme während Trennvorgang	13
Abbildung 6: Thermografieaufnahme des Diamantseils kurz nach Schnittende	13
Abbildung 7: Produktionszyklus im Steinbruch [28]	14
Abbildung 8: Zerteilen des Hauptblocks	15
Abbildung 9: Scheibenschneiden der Endblöcke	15
Abbildung 10: Konturschnitt an barockem Grabkreuz [36]	15
Abbildung 11: Profilierung eines Pfeilerabdeckers [36].....	15
Abbildung 12: Schiffsheck umschlungen von Diamantseil	17
Abbildung 13: Abgetrenntes Schiffsheck	17
Abbildung 14: Komplettes Fahrzeug der Länge nach aufgeschnitten	17
Abbildung 15: Vorversuch zum Abtrennen einer Edelstahlkonsole,	18
Abbildung 16: Umschlingendes Verfahren.....	19
Abbildung 17: Tiefenschnitt mit Sacklöchern	19
Abbildung 18: Schienengeführte Seilsäge [60]	20
Abbildung 19: Multi-Seilsäge-Maschine [35].....	20
Abbildung 20: Eine Kreisseilsäge im Einsatz [61]	21
Abbildung 21: Schematische Darstellung Kreisseilsäge [61].....	21
Abbildung 22: Schnittdarstellung zum Aufbau des Diamantseils.....	23
Abbildung 23: Detailbetrachtung Diamantseil	23
Abbildung 24: Gesintertes Segment im Schnitt.....	25
Abbildung 25: Galvanisches Segment im Schnitt.....	25
Abbildung 26: Gelötetes Segment im Schnitt.....	25
Abbildung 27: Galvanisches Segment mit Verschleißerscheinungen.....	25
Abbildung 28: Härte und Bruchzähigkeit synthetischer Schleifkornmaterialien [71]	27
Abbildung 29: Vorgänge beim Schleifkorneingriff [76].....	28
Abbildung 30: Werkstoffverdrängung beim Eindringen eines stumpfen Kornes [76]	29
Abbildung 31: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Werkstückoberfläche [76]	29
Abbildung 32: Materialtrennmechanismen an sprödharten Werkstoffen [63]	30
Abbildung 33: Darstellung des Eingriffwinkels	31
Abbildung 34: Seilspannungen beim umschlingenden Verfahren nach [1].....	31
Abbildung 35: Prozesskinematik eines Diamantsegmentes in der Arbeitsebene	32
Abbildung 36: Prozesskräfte die auf ein Diamantsegment wirken.....	33
Abbildung 37: Energieverteilung und Wärmefluss während des Schneideneingriffs [74]	34
Abbildung 38: Kornverschleißarten [39].....	36
Abbildung 39: konischer Verschleiß der Diamantsegmente im Vergleich zu Neuzustand	37
Abbildung 40: Exzentrischer Verschleiß	37
Abbildung 41: Körnungslinie eines Beispiels 1	38
Abbildung 42: Graphische Ablaufdarstellung	40
Abbildung 43: Seilsäge DS-WS 15 der Firma Hilti Corporation [94].....	40
Abbildung 44: Versuchstand mit Wasserbecken von vorne	42
Abbildung 45: CAD Bild der Wechsellvorrichtung mit Seilführung	42

Abbildung 46: Wechsellvorrichtung mit Werkstück, Seilverlauf und Wasserhöhe	42
Abbildung 47: Rechteckiges Werkstück.....	45
Abbildung 48: Rundes Werkstück.....	45
Abbildung 49: Seitenansicht auf das Werkstück zur Veranschaulichung der zwei mit dem...46	
Abbildung 50: Erster Schnitt eines noch unvollständig getrennten Werkstücks	46
Abbildung 51: Analysesiebmaschine AS 200 control der Firma Retsch GmbH [98]	47
Abbildung 52: Präzisionswaage der Firma Mettler Toledo GmbH.....	47
Abbildung 53: Scherkraftaufnehmer [101].....	48
Abbildung 54: Scherkraftwägezelle [101].....	48
Abbildung 55: Drehwinkelsensor [102]	48
Abbildung 56: Schematische Darstellung der Eingriffssituation	49
Abbildung 57: Prinzipskizze der Messtechnik am Seilsägeversuchstand.....	50
Abbildung 58: Eingangsparameter und Ausgangsgrößen für eine Seilsäge.....	51
Abbildung 59: Schematisches Beispieldiagramm	55
Abbildung 60: Einflussmatrix für das System Seilsäge beim umschlingenden Verfahren.....	57
Abbildung 61: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung für R1	62
Abbildung 62: Trennzeit/-leistungen der Versuchsreihe R1	63
Abbildung 63: Mittlere Spangröße für die Versuche der Reihe R1	64
Abbildung 64: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung für R2	65
Abbildung 65: Trennzeiten der Versuchsreihe R2.....	66
Abbildung 66: Mittlere Spangröße für die Versuche der Reihe R2.....	67
Abbildung 67: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung für R3	68
Abbildung 68: Trennzeiten der Versuchsreihe R3.....	69
Abbildung 69: Mittlere Spangröße für die Versuche der Reihe R3.....	70
Abbildung 70: Trennzeiten der Versuchsreihe R4.....	71
Abbildung 71: Mittlere Spangröße für die Versuche der Reihe R4.....	72
Abbildung 72: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung für R5	73
Abbildung 73: Trennzeiten der Versuchsreihe R5.....	74
Abbildung 74: Mittlere Spangröße für die Versuche der Reihe R5.....	75
Abbildung 75: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung für R6	76
Abbildung 76: Trennzeiten der Versuchsreihe R6.....	77
Abbildung 77: Mittlere Spangröße für die Versuche der Reihe R6.....	78
Abbildung 78: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung für R7	79
Abbildung 79: Trennzeiten der Versuchsreihe R7.....	80
Abbildung 80: Mittlere Spangröße für die Versuche der Reihe R7.....	81
Abbildung 81: Trennzeiten der Versuchsreihe R8.....	82
Abbildung 82: Mittlere Spangröße für die Versuche der Reihe R8.....	83
Abbildung 83: Trennzeiten der Versuchsreihe R9.....	84
Abbildung 84: Mittlere Spangröße für die Versuche der Reihe R9.....	85
Abbildung 85: Trennzeiten der Versuchsreihe R10.....	86
Abbildung 86: Mittlere Spangröße für die Versuche der Reihe R10.....	87
Abbildung 87: Trennzeiten der Versuchsreihe R11.....	88
Abbildung 88: Mittlere Spangröße für die Versuche der Reihe R11.....	89
Abbildung 89: 3D-Modell der Versuchseinrichtung	91
Abbildung 90: Realer Aufbau am Versuchsstand.....	91
Abbildung 91: Diagramm der Kraftverläufe über der Zeit,	92
Abbildung 92: Schnittbild der getrennten Blöcke D1, D2, D3, D4 und D5	94
Abbildung 93: Eingriffssituation durch die Seilspannung.....	95
Abbildung 94: Qualitativ anzunehmender Kraftverlauf der Blöcke in x-Richtung.....	95

Abbildung 95: Zur Tauchseilsäge umgerüsteter Versuchsstand	96
Abbildung 96: Detailbetrachtung der Probenaufnahme.....	96
Abbildung 97: Angesägte Werkstückprobe	97
Abbildung 98: Kraftverlauf des Diamantseils durch das Werkstück.....	98
Abbildung 99: Darstellung der Seilspannungen für Ein- und Austrittsseite des Werkstücks..	99
Abbildung 100: Schematische Darstellung der Kräfte	100
Abbildung 101: Aufbau für den Drehwinkelsensor	101
Abbildung 102: Zeitlicher Eingriffswinkelverlauf	102
Abbildung 103: Phasen beim Trennen eines rechteckigen, quer liegenden Werkstücks.....	103
Abbildung 104: Ermittelte Schnittriefen für ein rechteckiges, quer liegendes Werkstück.....	104
Abbildung 105: Ermittelte Eingriffslänge für verschiedene Geometrien.....	105
Abbildung 106: Entwicklung des getrennten Flächeninhalts für verschiedene Geometrien.	105
Abbildung 107: Vergleich der Schnittleistungen für alle Versuchsreihen.....	107
Abbildung 108: Mittlere Trennzeiterhöhung zwischen den Versuchen in einer Reihe	109
Abbildung 109: Mittlere Abnahme der Trennleistung	110
Abbildung 110: Quotient aus Gesamtleistung mit der mittleren.....	112
Abbildung 111: Vergleich der Trennzeiten für die Versuchsreihen R1 und R9	114
Abbildung 112: Vergleich der Trennzeiten für die Versuchsreihe R3 und R4	116
Abbildung 113: Vergleich der Trennzeiten für die Versuchsreihen R6 und R8.....	118
Abbildung 114: Winkeländerung durch Herabsetzen von rechteckigen, quer	120
Abbildung 115: Winkeländerung durch Herabsetzen von runden Werkstücken	120
Abbildung 116: Vergleich der Trennzeiten für die Versuchsreihe R1, R6 sowie R2 und R7	121
Abbildung 117: Detailbetrachtung der Winkel zu Beginn des Trennprozesses	122
Abbildung 118: Vergleich der Trennzeiten für die Versuchsreihen R1, R2 und R3	124
Abbildung 119: Verlauf der mittleren Spangröße	126
Abbildung 120: Mittlere Spangröße der Versuchsreihen.....	127
Abbildung 121: mittlere Spangröße aufgetragen über der mittleren Gesamtleistung	128
Abbildung 122: Übersicht über die möglichen Variationen.....	130
Abbildung 123: Vergleich der theoretischen Trennzeitvorhersage	132

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der Seilsägetechnologie.....	11
Tabelle 2: Technische Daten der DS-WS 15 [94]	41
Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung für vergütete Stähle [95]	44
Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung für den Werkstoff 1.4301 [96]	44
Tabelle 5: Ergebnisse aus Zugversuchen.....	44
Tabelle 6: Vergleich von rechteckigen und runden Werkstücken	45
Tabelle 7: Schema der Datenbasis einer Einflussmatrix	54
Tabelle 8: Datenbasis für das System Seilsäge im umschlingenden Verfahren	56
Tabelle 9: Auflistung des kompletten Versuchsprogramms	60
Tabelle 10: Vergleich der Versuchsreihen R1 und R9	113
Tabelle 11: Vergleich der Versuchsreihen R3 und R4	116
Tabelle 12: Vergleich der Versuchsreihen R6 und R8	118
Tabelle 13: Vergleich von Versuchsreihe R1 und R6 sowie R2 und R7	120
Tabelle 14: Vergleich der Versuchsreihen R1,R2 und R3.....	123
Tabelle 15: Faktoren zur Modellerstellung	129
Tabelle 16: Auflistung der Trennzeitformel für alle Variationen	130

Literaturverzeichnis

- [1] PANHORST, H. J.: *Seilsägen von Granit mit Diamantwerkzeugen*, Dissertation, Universität Hannover, 1974
- [2] SCHEIDEGGER, FRITZ: *Aus der Geschichte der Bautechnik: Grundlagen* : Springer DE, 1994
- [3] MEHLING, GÜNTHER: *Naturstein-Lexikon: Werkstoff, Werkzeuge u. Maschinen ; Wirtschaft u. Handel ; Gestaltung u. Techniken von d. Antike bis heute*. München : Callwey, 1986
- [4] REITH, A.: *Maschinen in der Natursteinindustrie Bd. Industrial Diamand Review* (1968)
- [5] VOGT, B: *Bow of the Kursk cut with 'diamond chain'*. In: *IDR. Industrial diamond review* Bd. 62 (2002), Nr. 594, S. 151–154
- [6] FAHRENWALDT, HANS J: *Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Prozesse, Fertigung ; mit 141 Tabellen*. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2009
- [7] THIERFELDT, S ; SCHARTMANN, F: *Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen* : Brenk Systemplanung, 2000
- [8] RZANY, BERNHARD: *Laserstrahlschneiden*. Düsseldorf : Dt. Vlg. f. Schweißst, 1995
- [9] WAIDELICH, W: *Laser: Optoelektronik in der Technik. Vorträge des 9. Internationalen Kongresses, München 1989*. Berlin : Springer, 1990
- [10] FRITZ, ALFRED HERBERT: *Fertigungstechnik*. Berlin; Heidelberg : Springer, 2008
- [11] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 8580 Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*, DIN (2003)
- [12] DILLINGER, JOSEF: *Fachkunde Metall*. Haan-Gruiten : Verl. Europa-Lehrmittel, 2007
- [13] KRAPS, UWE ; DUWE, PETER: *Zerlegung und Konditionierung des Reaktordruckgefäßes im Kernkraftwerk Würgassen*. In: *Jahrestagung Kerntechnik (JTK)*. Berlin, 2011
- [14] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 8589 Fertigungsverfahren Spanen - Teil 15: Läppen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, DIN (2003)
- [15] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 8589 Fertigungsverfahren Spanen - Teil 11: Schleifen mit rotierendem Werkzeug; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, DIN (2003)
- [16] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 8589 Fertigungsverfahren Spanen - Teil 12: Bandschleifen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, DIN (2003)
- [17] SALJÉ, E.: *Begriffe der Schleif- und Konditionierungstechnik*. Essen : Vulkan Verlag, 1991

- [18] HOFFMANN, JÜRGEN: Industrielle Anwendung des Seilsägens. In: *MASCHINENMARKT-WURZBURG*- Bd. 103 (1997), S. 30–32
- [19] BRUNO, R. ; PASPALIARIS, I.: Ornamental and Dimensional Stone Market Analysis, vol. 13. In: *OSNET Editions, Laboratory of Metallurgy, National Technical University of Athens* (2004)
- [20] KONSTANTY, JANUSZ: *Powder metallurgy diamond tools*: Elsevier Science, 2011
- [21] HUANG, A. H.: The Cooling Effects of Coolant Supply Mode for Granite Sawing with Diamond Wire. In: *1st International Conference on Stone and Concrete Machining*, 2011
- [22] BERUFGENOSSENSCHAFT BAU (BG BAU): (Nr. B 188 Seilsägen)
- [23] HILTI CORPORATION: *Diamand wire saw system operating instructions*. Schaan, Liechtenstein, 2005
- [24] SCHMITZ, A. ; AMBOS, F. ; DANNER, C. ; SIEGENTHALER, E.: Trocken-Seilsägen an Beton- und Stahlstrukturen in kerntechnischen Anlagen. In: *Proceedings zur Internationalen Schneidtechnischen Tagung*. Hannover, 2006
- [25] DENKENA, B. ; KÖHLER, J. ; SEIFFERT, F.: Anpassung der Seilschleiftechnologie an die besonderen Anforderungen des Rückbaus kerntechnischer Anlagen. In: *atw* Bd. 56 (2011), Nr. 8/9, S. 469–476
- [26] REINSCH, DIETMAR: *Natursteinkunde: eine Einführung für Bauingenieure, Architekten, Denkmalpfleger und Steinmetze; 16 Tabellen*. Stuttgart : Enke, 1991
- [27] KIENER, D. ; RUSS, P.: Diamant-Seilsäge für Steinbrüche. In: *Industrial Diamond Review* 31 (1997), S. 150–151
- [28] KREMSHOFER, S.; SEEBACHER, H.: Developments in diamond wire cutting for granite quarries. In: *1st International Conference on Stone and Concrete Machining*. Hannover, 2011
- [29] ARVANITIDIS, N.: New perspectives for sustainable quarrying of ornamental stones in Europe. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Advances in Mineral Resources Management and Environmental Geotechnology (AMIREG 2004)*. Hania, 2004, S. 293–298
- [30] TATIYA, RATAN: *Surface and underground excavations methods, techniques and equipment*. Leiden; London: A.A. Balkema, 2005
- [31] PASPALIARIS, I. ; KATALAGARIANAKIS, G.: Ornamental and dimensional stones network. In: *Proceedings of 2nd Annual Workshop*. Pisa, 2002
- [32] DENKENA, B ; TÖNSHOFF, HK ; FRIEMUTH, T ; GIERSE, A ; GLATZEL, T ; HILLMANN-APMANN, H: Innovative Trennschleifprozesse in der Natursteinbearbeitung. In: *Werkstatttechnik online* Bd. 92 (2006), S. 290–296
- [33] FALKENSTEIN, J.: Einsatzmöglichkeiten von Diamant-Sägeseielen in der Natursteinbearbeitung. In: *IDR. Industrial diamond review* (1989), S. 190–192

- [34] DAVIS, P. R.: Mehrfach-Seilsäge zum Plattenschneiden von Granit. In: *IDR. Industrial diamond review* (1997), S. 341–344
- [35] PELLEGRINI: Produkt Katalog Seilsäge Diablo (2013)
- [36] STEINMETZ- UND STEINBILDHAUEREI SCHWARTZENBERG: www.3s-restaurierung.de. — Block- und Konturseilsäge Hensel 584
- [37] MAYER, WOLFGANG: Wire saw for cutting contours in stones or similar work pieces.
- [38] RUSS., P.: Diamant-Seilsägetechnik im Bötzing-Straßentunnel. In: *Schleifen+Trennen* (1993), Nr. 118, S. 17–18
- [39] SCHULZE, REINER: *Trennschleifen von Hartgestein*. Dissertation, Universität Hannover, 1980
- [40] FACHVERBAND BETONBOHREN UND -SÄGEN: *Handbuch Betonbohren und -sägen*. [Bergisch Gladbach] : Fachverb. Betonbohren und -sägen Deutschland, 1999
- [41] MARQUES, P.: Kreisseilsägetechnik - Grundlagen und Anwendung. In: *IDR. Industrial diamond review* Bd. 32 (1998), S. 138–141
- [42] FRÖSSEL, FRANK: *Lexikon der Bauwerkstrockenlegung*. Augsburg : WEKA-Baufachverl., Verl. für Bauwirtschaft und Bauhandwerk, 1997
- [43] PECH, ANTON: Mechanische Verfahren zur Mauerwerkstrockenlegung – Horizontalabdichtung. In: *Mauerwerk* Bd. 11 (2007), Nr. 2, S. 93–100
- [44] MAACK, JÜRGEN: Schallschutz zwischen Reihenhäusern mit unvollständiger Trennung. In: *Bauphysik* Bd. 28 (2006), Nr. 4, S. 244–252
- [45] VEIT, IVAR: Sägen für den Schallschutz Bd. Trockenbau Akustik (2008), Nr. 06/2008, S. 38–41
- [46] ZILM, F. ; WILMAR, G.: Diamant-Seilsägen zum Sägen von Trennfugen in Doppelhäusern. In: *IDR. Industrial diamond review* (1989), Nr. 23, S. 151–153
- [47] SCHÜTZEICHEL, K.: Brückenabbruch mit Diamant-Sägeseil. In: *IDR. Industrial diamond review*, Nr. 2, S. 179–180
- [48] BÖHME, BERT: Trennschleifen von Sonderstrukturen mittels Diamantseil, 6. IFW-Steinkolloquium - Entwicklungen in der Naturstein- und Bauwerkstoffbearbeitung (2008)
- [49] JENNINGS, M.: Brückenaufhängung mit Diamantseil geschnitten. In: *Industrial Diamond Review* Bd. 4 (1995)
- [50] DICKEL, G.: Seilsägen im U-Bahnschacht. In: *Beton-Bohrer* (1999), Nr. 14, S. 14–15
- [51] DONAUER, D.: Seilsägearbeiten in der Wiener U-Bahn. In: *Beton-Bohrer* (1998), Nr. 11, S. 8

- [52] PHILIPP, R.: Demontage eines runden Betonfundamentes. In: *Der Beton-Bohrer* (1999), Nr. 14
- [53] JAHN, C.: *Rückbau von Offshore-Windenergieanlagen*. Hamburg : Institut für Maritime Logistik, 2013
- [54] LIHUA, F.: Overview of Underwater Welding and Cutting. In: *China Offshore Oil and Gas* Bd. 3 (2000), Nr. 12, S. 1–4
- [55] DONAUER, D.: Seilsäge als Tresorknacker. In: *IDR. Industrial diamond review* (1999), Nr. 1, S. 69–70
- [56] GENTES, SASCHA; ZEIHNER, MARCO: Gekapselte Trocken Seilsägetechnologie für staubempfindliche Bereiche. In: *Bautechnik* Bd. 82 (2005), Nr. 6, S. 387–388
- [57] KNECHT, D.; GENTES, S.: Neuentwicklung eines Messgeräts zur Verschleißklassifizierung von Diamantseilen. In: *Hochleistung Diamantwerkzeuge* (2013), Nr. 1, S. 26–31
- [58] ZEIHNER, MARCO: *Ein Entscheidungsunterstützungsmodell für den Rückbau massiver Betonstrukturen in kerntechnischen Anlagen*. Dissertation, Karlsruhe, Univ.-Verl., 2009
- [59] JENNINGS, M.: Diamantseilsäge im Test. Natursteinbearbeitung mit Diamant. In: *Industrial Diamond Division* (1990), S. 49
- [60] MARINI QUARRIES GROUP: *Seilsägetechnik* (Katalog). Villadossola, Italy, 2013
- [61] JOSEF SEIDL GMBH: *Kreisseilsäge*. URL www.seidl.at
- [62] ERTINGSHAUSEN, W: *Zerspannung von Granit mit Diamant-Trennschleifscheiben*, Dissertation: Universität Hannover, 1984
- [63] DENKENA, BEREND ; TÖNSHOFF, H. K: *Spanen Grundlagen*. Heidelberg; New York : Springer, 2011
- [64] APMANN, H.: *Seilschleifen von metallischen und mineralischen Werkstoffen*, Dissertation, PZH, Produktionstechn. Zentrum, 2004
- [65] SägeseiLe, die neue Dimension für den Hochleistungsschnitt. Produktkatalog, Tyrolit (2013)
- [66] HALLEZ, C.P.: Sägen von Marmor mit Diamant-Seilsägen. In: *Industrie Diamanten Rundschau* Bd. 4 (1970), S. 180–185
- [67] OSENBERG, W.: Anregung für neuartige Gestaltungen von diamantkorndurchsetzten Werkzeugen für die Steinbearbeitung. In: *Industrie Diamanten Rundschau* Bd. 4 (1970), S. 172–179
- [68] GAIDA, BERNHARD: *Einführung in die Galvanotechnik: Grundlagen der chemischen, elektrochemischen, physikalischen und elektrotechnischen Begriffe*. Saulgau/Württ. : Leuze, 1999

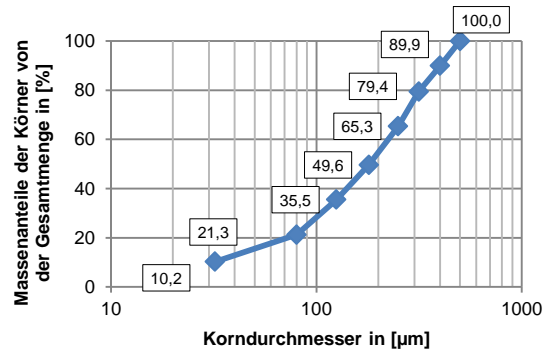
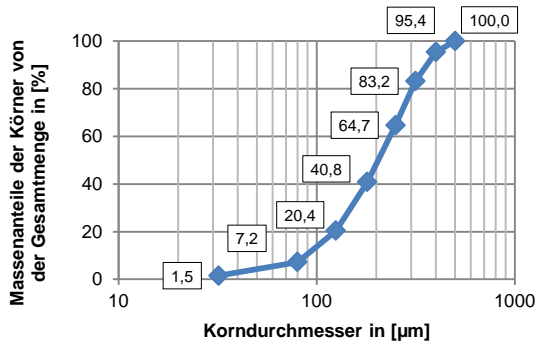
- [69] SCHATT, WERNER: *Sintervorgänge*. Düsseldorf : VDI-Verl., 1992
- [70] BURKHARD, G.; ZIGERLIG, B.; BORETIUS, M.: Spanen mit definiert angeordneten Diamant-oder cBN-Körnern. In: *IDR* Bd. 36 (2002), Nr. 2, S. 96–100
- [71] HELLETSBERGER, H. ; NOICHEL, J.: Grenzwerte und Wirtschaftlichkeit von Korund, Sinterkorund und CBN, Einsatzbereiche von Schleifscheiben. In: *Technische Rundschau* (1993), Nr. 5, S. 640–659
- [72] LEICHTER, S.: Auswahl günstiger Schleifmittel für die Fertigung. In: *Technische Mitteilungen* Bd. 68 (1975), S. 48
- [73] WENTORF, R. H.: Diamond growth rates. In: *The Journal of Physical Chemistry* Bd. 75 (1971), Nr. 12, S. 1833–1837
- [74] KLOCKE, FRITZ; VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *Fertigungsverfahren*. Berlin ; New York : Springer, 2005
- [75] NEUHAUS, A.: Über die Synthese des Diamanten. In: *Angewandte Chemie* Bd. 66 (1954), Nr. 17-18, S. 525–536
- [76] PAUCKSCH, EBERHARD ; HOLSTEN, SVEN ; LINß, MARCO ; TIKAL, FRANZ: *Zerspantechnik: Prozesse, Werkzeuge, Technologien* : Vieweg+Teubner Verlag, 2008
- [77] ASCHE, JENS: *Tiefschleifen von Granit*. Düsseldorf : VDI-Verl., 2001
- [78] ROTH, PETER: *Abtrennmechanismen beim Schleifen von Aluminiumoxidkeramik*. Düsseldorf : VDI-Verl., 1995
- [79] LIERSE, TJARK: *Mechanische und thermische Wirkungen beim Schleifen keramischer Werkstoffe*. Dissertation, Düsseldorf, VDI-Verl., 1998
- [80] BORTOLUSSI, A.: Computer simulation of diamond-wire cutting of hard and abrasive rock. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* Bd. 32 (1995), Nr. 3, S. A122
- [81] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: DIN 6580 Bewegung und Geometrie des Zerspanvorganges (1985)
- [82] BUTLER-SMITH, P. W.; GYZAGORIDIS, J. ; DAVIS, P. R.: Untersuchungen zur Bestimmung des Einsatzverhaltens von Seilsägen. In: *Industrial Diamond Review* Bd. 33 (1999), S. 124–134
- [83] TONSHÖFF, H.K.: Seilsägen zur Anwendung in kerntechnischen Anlagen. In: *Internationales Symposium „Konditionierung radioaktiver Betriebs- und Stilllegungsabfälle“*. CCH-Congress Centrum Hamburg, 1999
- [84] JAEGER, JC: Moving sources of heat and the temperature of sliding contacts. In: *J. and Proc. Roy. Soc. New South Wales*. Bd. 76, 1942, S. 202
- [85] STEPHENSON, DJ ; JIN, T: Physical basics in grinding. In: *1st European Conference on Grinding*. Bd. 2003, 2003, S. 1301–21

- [86] TRIEMEL, J.; PANHORST, H. J.: Wärmeentwicklung und Ermittlung der Temperatur bei der spanenden Bearbeitung mit Diamantwerkzeugen. In: *Industrie Diamanten Rundschau* Bd. 6 (1972), S. 137–145
- [87] TÖNSHOFF, H. K; ASCHE, J.: Verschleißverhalten von Diamantwerkzeugen in der Natursteinbearbeitung. In: *Industrie Diamanten Rundschau* Bd. 2 (1996), S. 107–114
- [88] TÖNSHOFF, HANS KURT: *Automatisierte Fertigung unter Wasser*. Weinheim: Wiley-VCH, 2003
- [89] BAILEY, M.W.; GARRARD, R.; JUCHEM, H.O.: Characteristics of diamond and their effect on grinding behaviour. In: *IDR. Industrial diamond review* Bd. 59 (1999), Nr. 580
- [90] BÜTTNER, A.: Diamond tools and stone. In: *Ind. Diamond Rev* Bd. 34 (1974), S. 89–93
- [91] TONSHÖFF, H.K.; APMANN, H.: Thermisches und mechanisches Trennen. In: *VI. Stilllegungskolloquium Hannover und 5. Statusbericht Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen*. Universität Hannover, 2000, S. 57–71
- [92] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: DIN 18123 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung, DIN (2011)
- [93] NEHRIG, MARKO: *Korngrößenseparation bei Steinschüttungen durch Fallrohre im Wasser*, Dissertation, Universitätsbibliothek, 2006
- [94] HILTI CORPORATION: *DS-WS 15 Electric wire saw*. URL www.hilti.com
- [95] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: DIN EN 10025-6 Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen - Teil 6: Technische Lieferbedingungen für Flacherzeugnisse aus Stählen mit höherer Streckgrenze im vergüteten Zustand, DIN (2011)
- [96] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: DIN EN 10088-3 Nichtrostende Stähle - Teil 3: Technische Lieferbedingungen für Halbzeug, Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung, DIN (2012)
- [97] WEGST, CLAUDIUS; WEGST, M: *Stahlschlüssel-Taschenbuch: Wissenswertes über Stähle*. Marbach/N. : Verl. Stahlschlüssel Wegst, 2010
- [98] RETSCH (Hrsg.): *Sieben für eine perfekte Qualitätskontrolle*. Haan, 2012
- [99] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: DIN EN ISO 9000 Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe, DIN (2005)
- [100] METTLER TOLEDO: *Bedienungsanleitung - Excellence Präzisionswaagen XS Modelle*. Greifensee, Schweiz, 2012
- [101] HKM MESSTECHNIK: Produktinformation Scherkraftaufnehmer SK 1.x / SK 2.x (2006)
- [102] VARIOHM EUROSENSOR: Produktinformationen zu Drehwinkelsensor SP2800 (2013)

- [103] KNECHT, D.; GENTES, S.: Automatisierte Seilsägetechnologie für Unterwasserdemontage. In: *KONTEC*. Dresden, 2011
- [104] VESTER, FREDERIC: *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome*. München: Deutscher Taschenbuchverlag, 2003

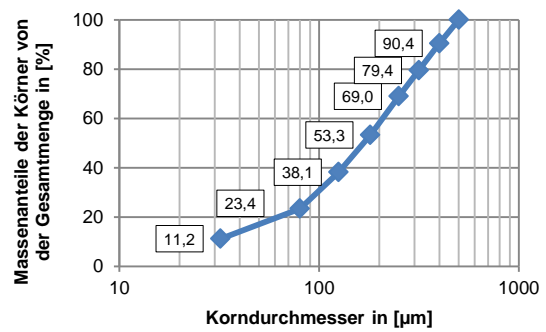
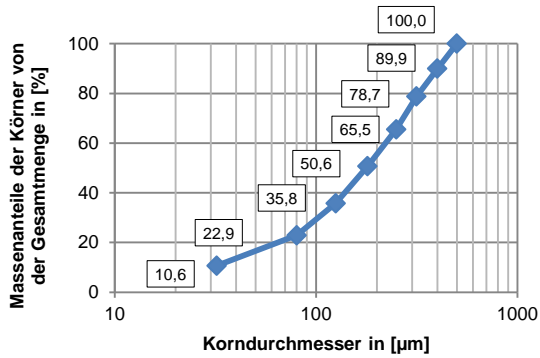
Anhang A

Ergebnisse aus der Klassifizierung der Spangrößen



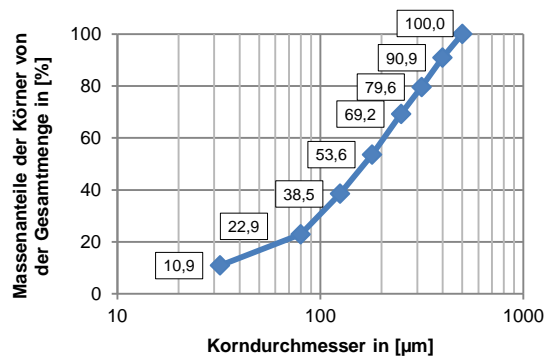
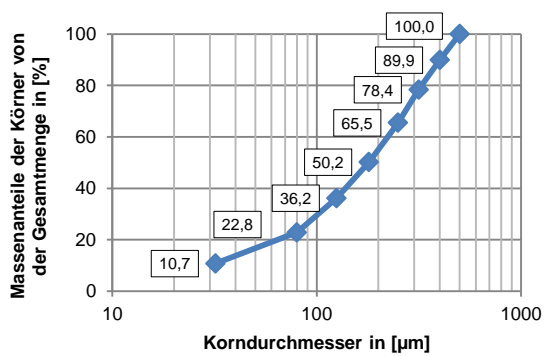
Spangrößenverteilung für R1W1

Spangrößenverteilung für R1W2



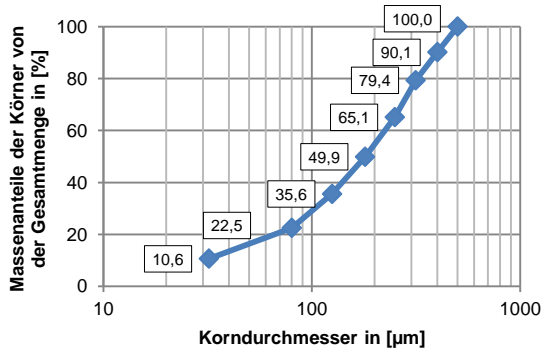
Spangrößenverteilung für R1W3

Spangrößenverteilung für R1W4

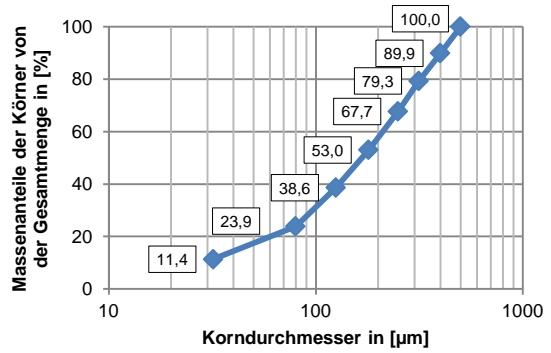


Spangrößenverteilung für R1W5

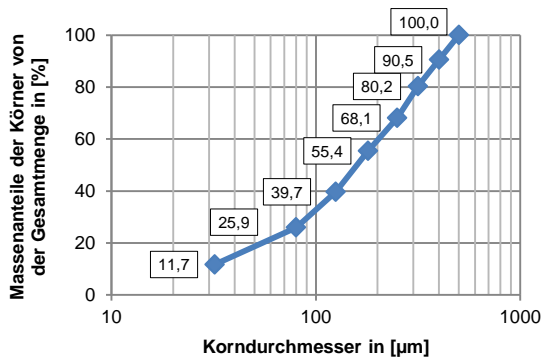
Spangrößenverteilung für R1W6



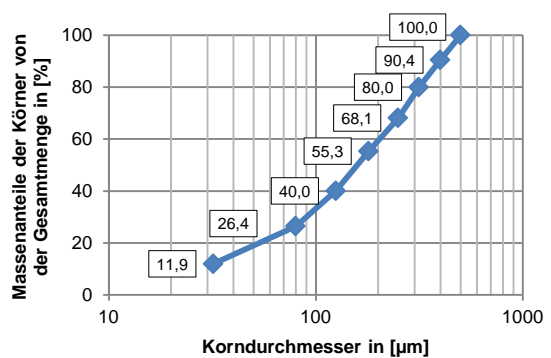
Spangrößenverteilung für R1W7



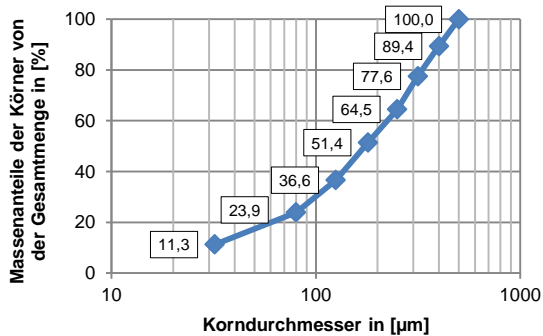
Spangrößenverteilung für R1W8



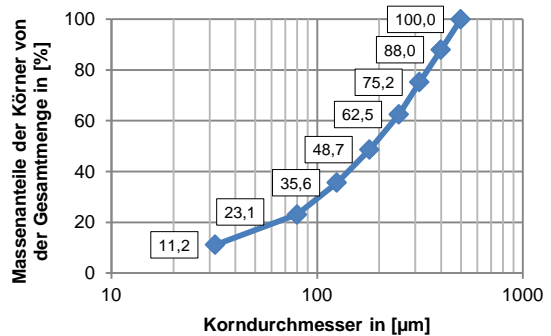
Spangrößenverteilung für R1W9



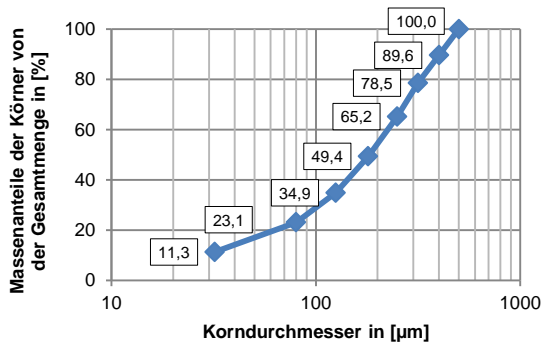
Spangrößenverteilung für R1W10



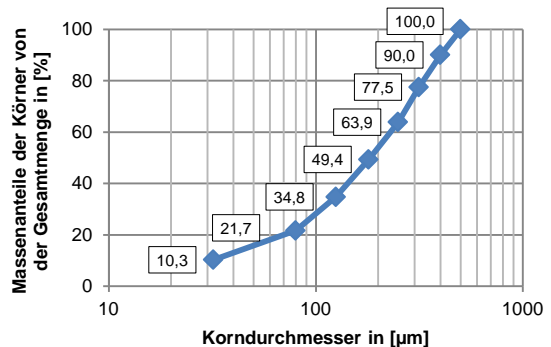
Spangrößenverteilung für R2W1



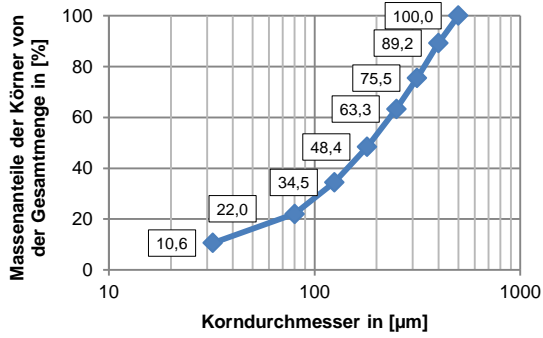
Spangrößenverteilung für R2W2



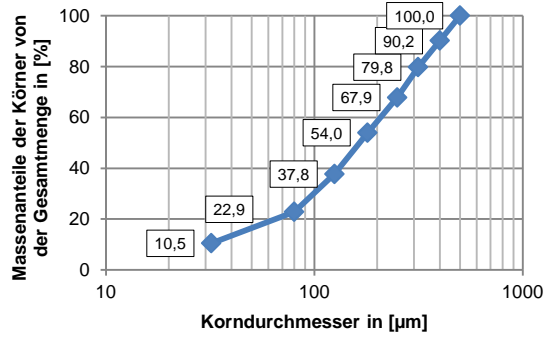
Spangrößenverteilung für R2W3



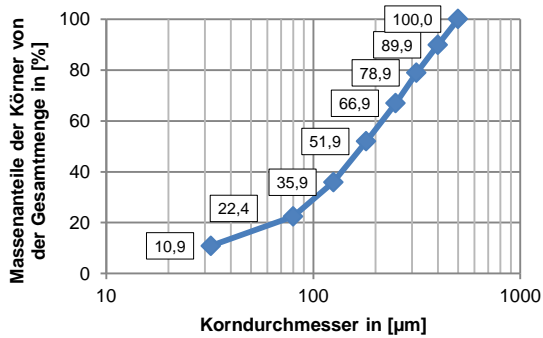
Spangrößenverteilung für R2W4



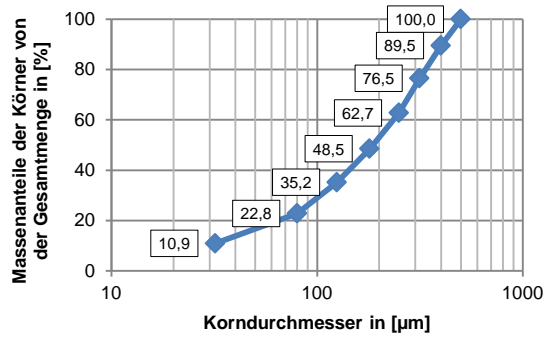
Spangrößenverteilung für R2W5



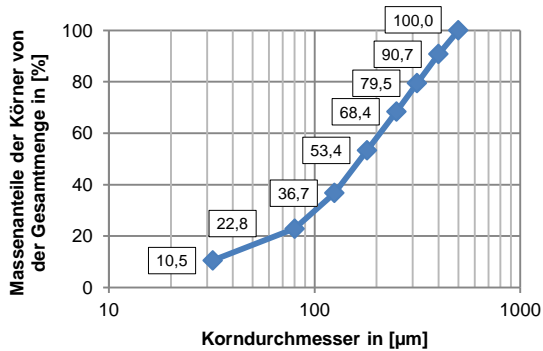
Spangrößenverteilung für R2W6



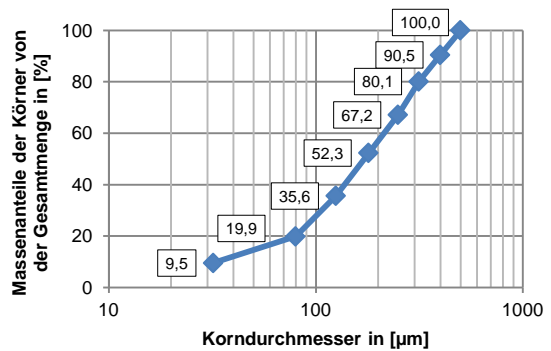
Spangrößenverteilung für R2W7



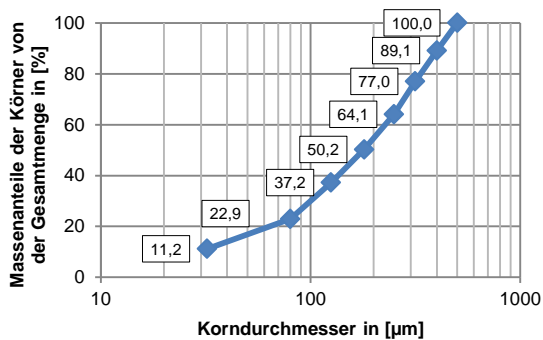
Spangrößenverteilung für R2W8



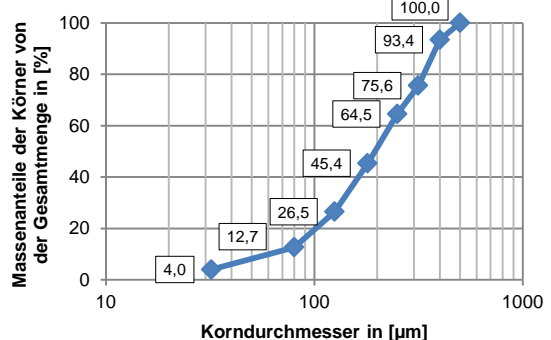
Spangrößenverteilung für R2W9



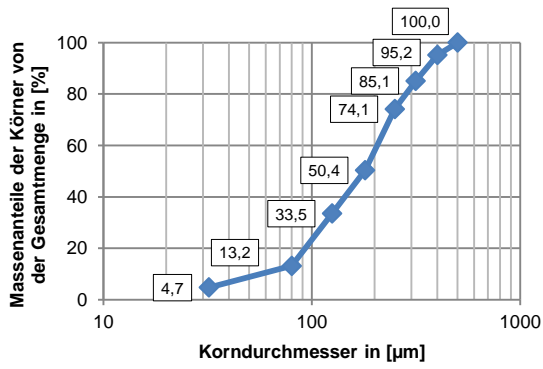
Spangrößenverteilung für R2W10



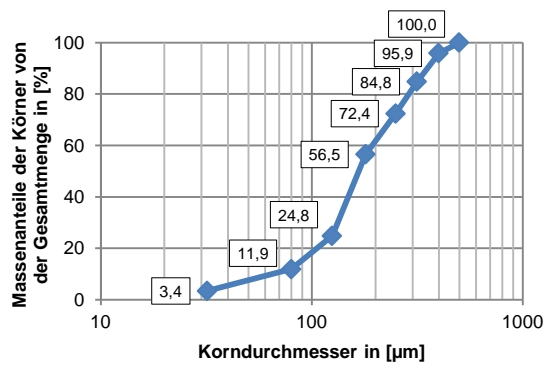
Spangrößenverteilung für R2W11



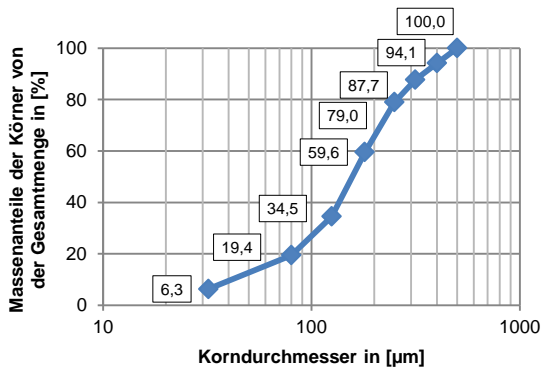
Spangrößenverteilung für R3W1



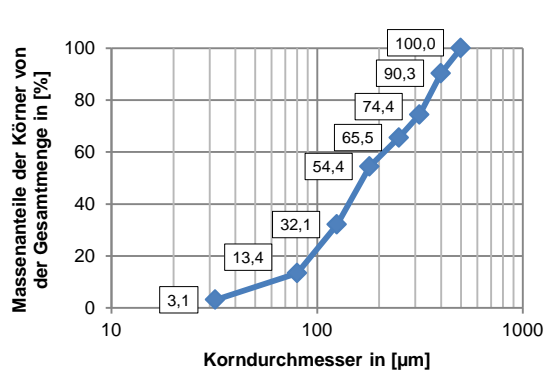
Spangrößenverteilung für R3W2



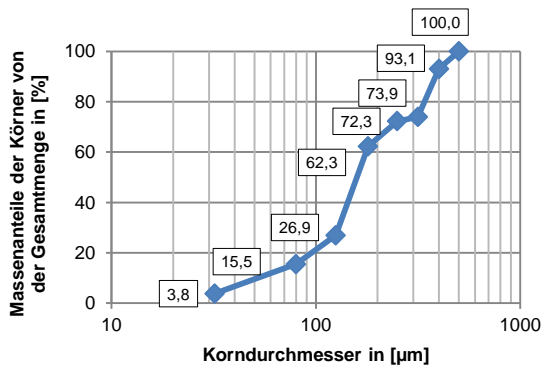
Spangrößenverteilung für R3W3



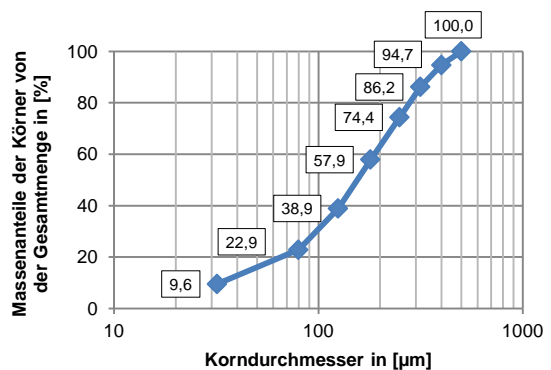
Spangrößenverteilung für R3W4



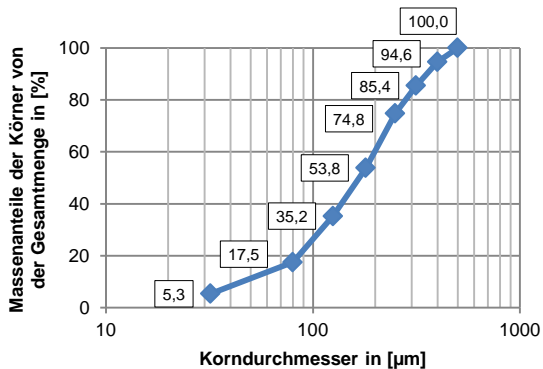
Spangrößenverteilung für R3W5



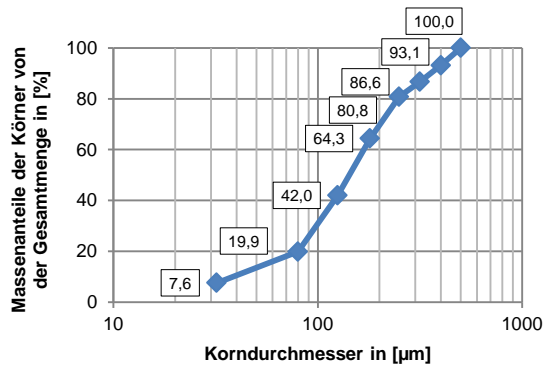
Spangrößenverteilung für R3W6



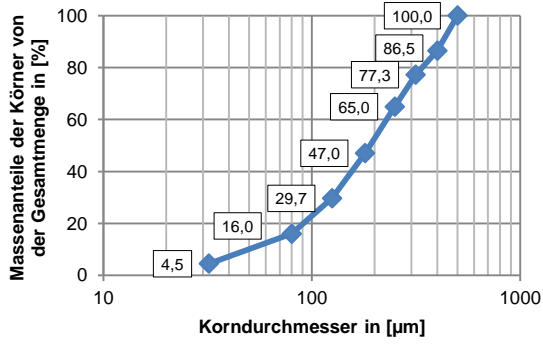
Spangrößenverteilung für R3W7



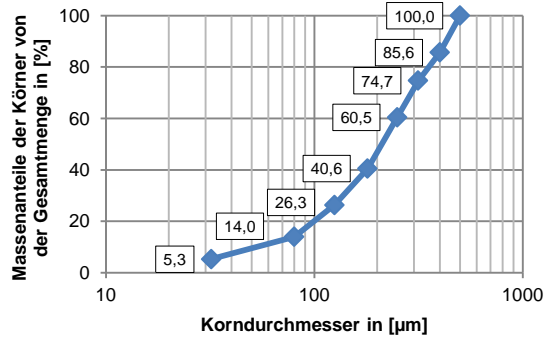
Spangrößenverteilung für R3W8



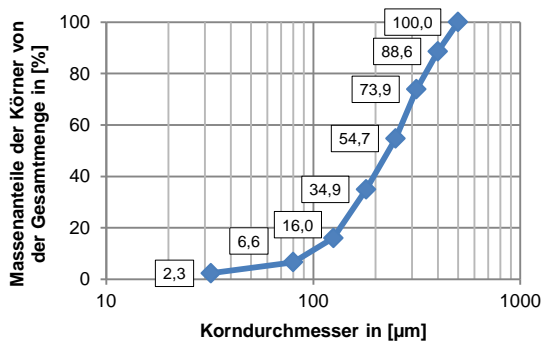
Spangrößenverteilung für R3W9



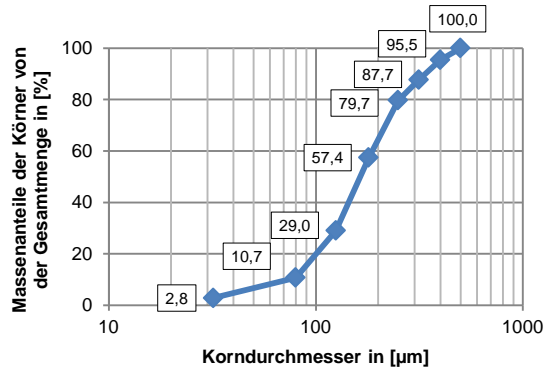
Spangrößenverteilung für R4W1



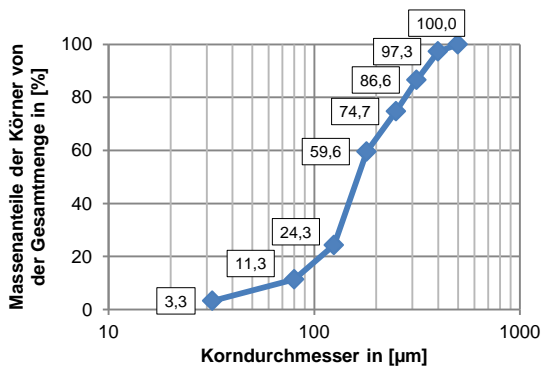
Spangrößenverteilung für R4W2



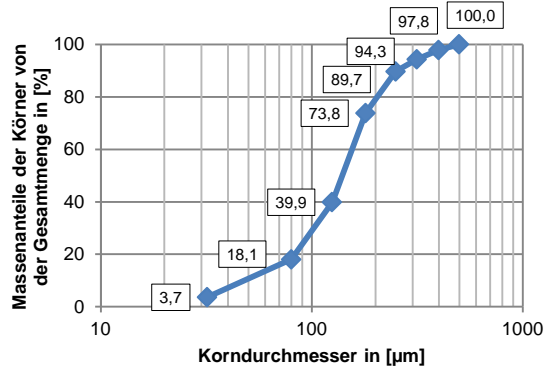
Spangrößenverteilung für R4W3



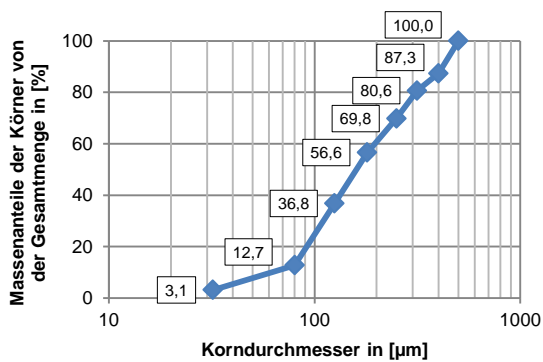
Spangrößenverteilung für R4W4



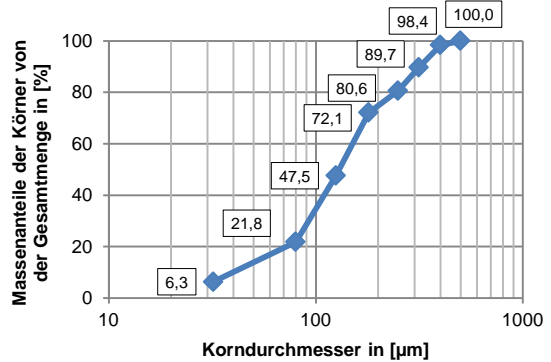
Spangrößenverteilung für R4W5



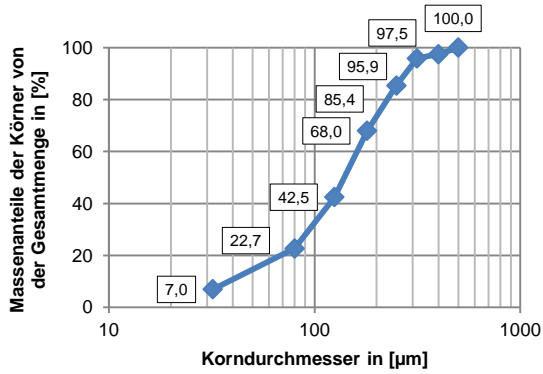
Spangrößenverteilung für R4W6



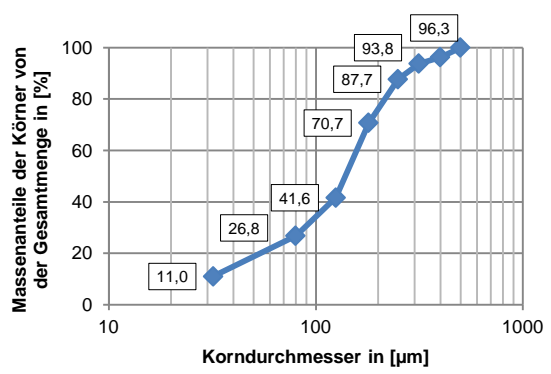
Spangrößenverteilung für R4W7



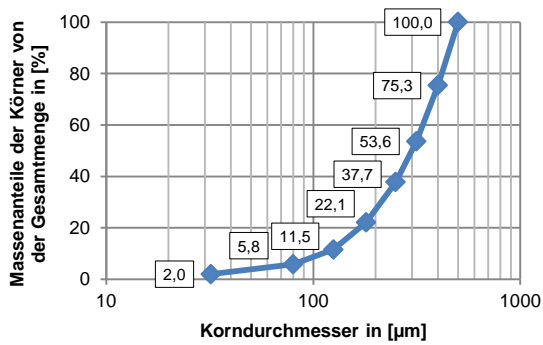
Spangrößenverteilung für R4W8



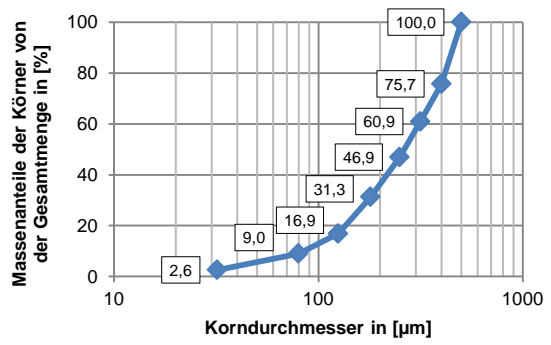
Spangrößenverteilung für R4W9



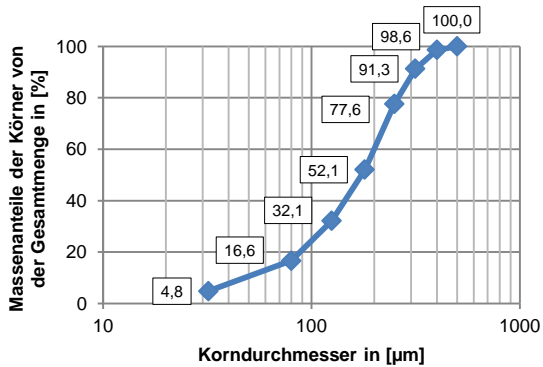
Spangrößenverteilung für R4W10



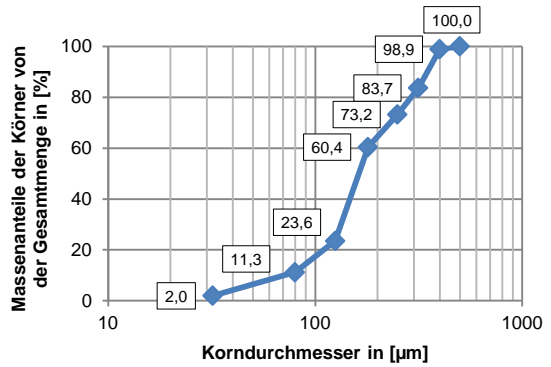
Spangrößenverteilung für R5W1



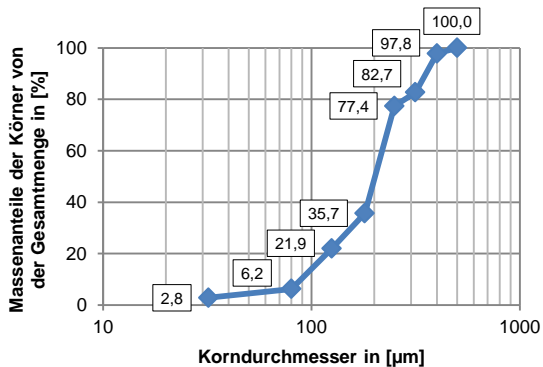
Spangrößenverteilung für R5W2



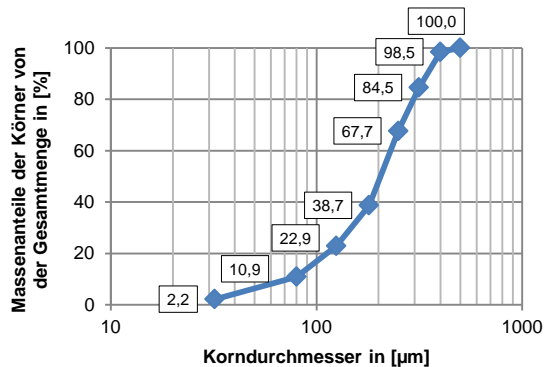
Spangrößenverteilung für R5W3



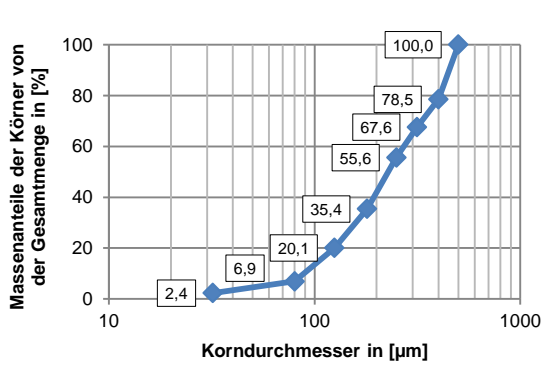
Spangrößenverteilung für R5W4



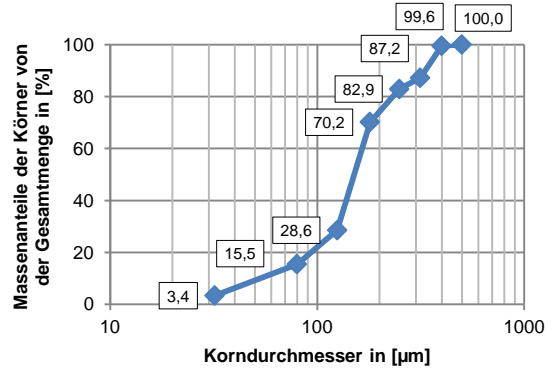
Spangrößenverteilung für R5W5



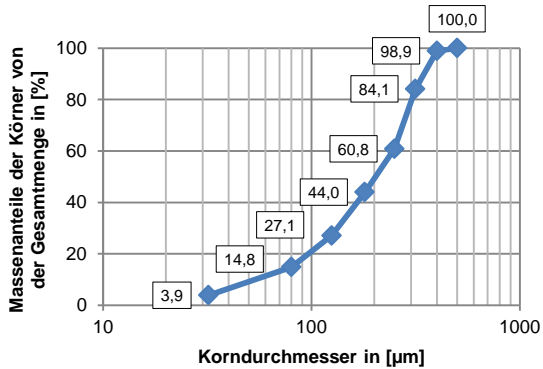
Spangrößenverteilung für R5W6



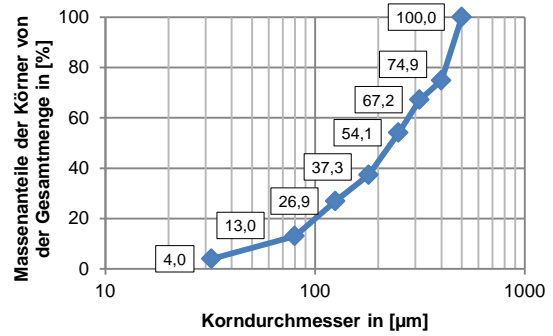
Spangrößenverteilung für R5W7



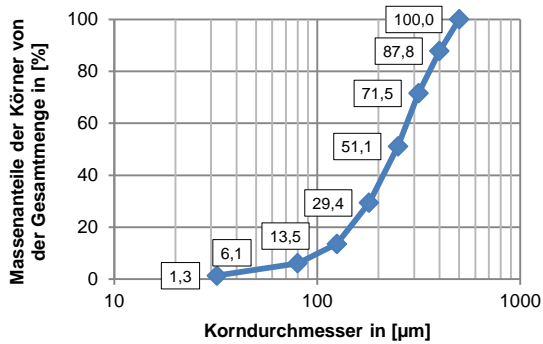
Spangrößenverteilung für R5W8



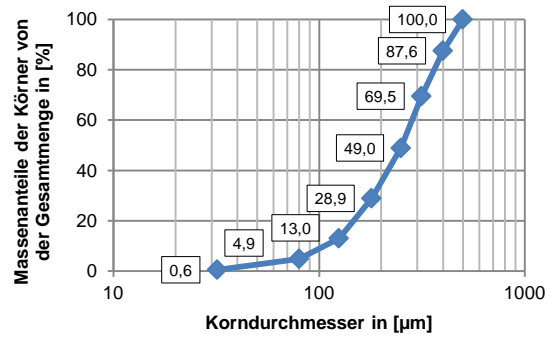
Spangrößenverteilung für R5W9



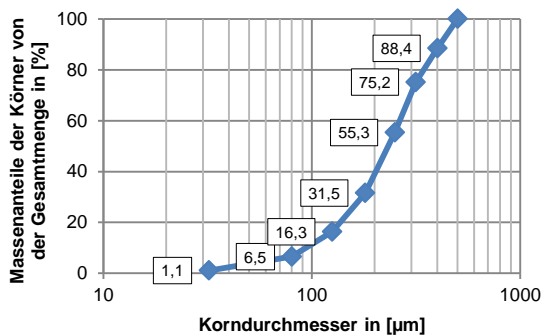
Spangrößenverteilung für R5W10



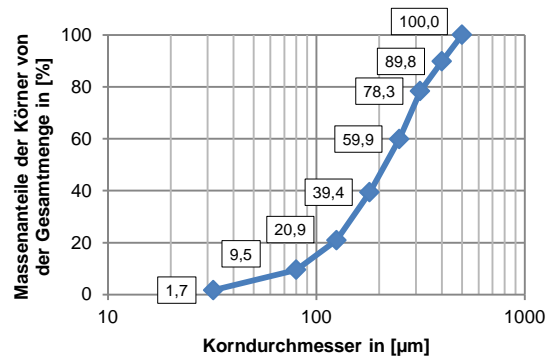
Spangrößenverteilung für R6W1



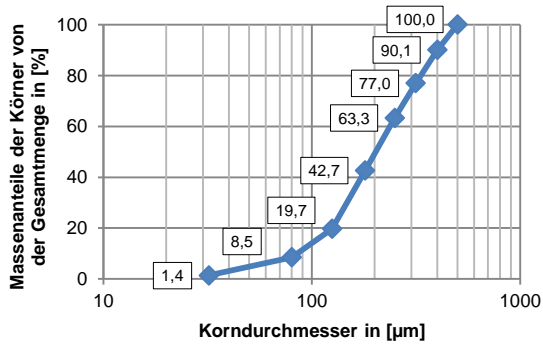
Spangrößenverteilung für R6W2



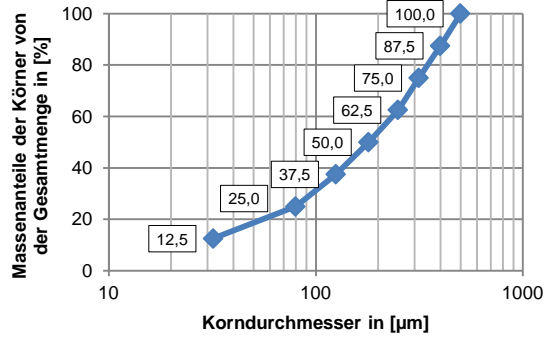
Spangrößenverteilung für R6W3



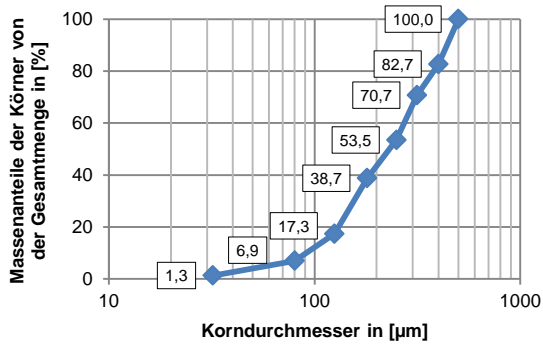
Spangrößenverteilung für R6W4



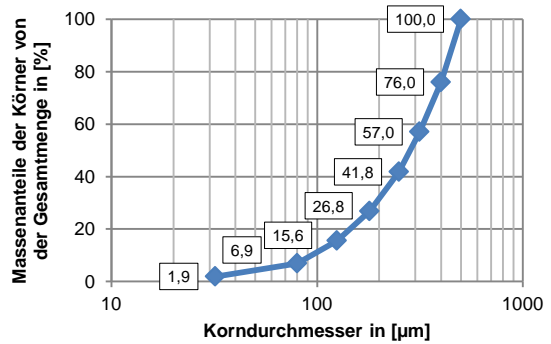
Spangrößenverteilung für R6W5



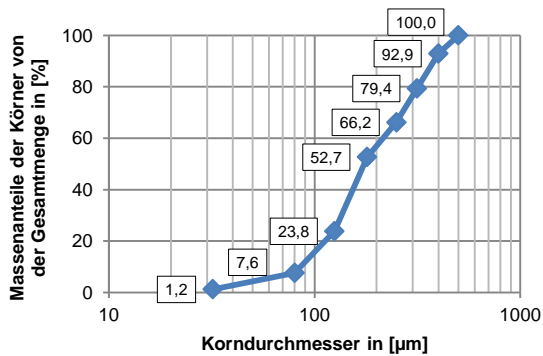
Spangrößenverteilung für R6W6



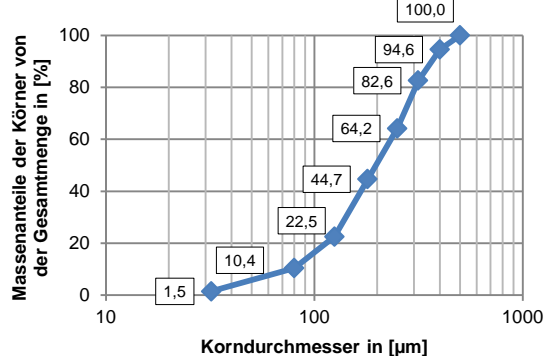
Spangrößenverteilung für R6W7



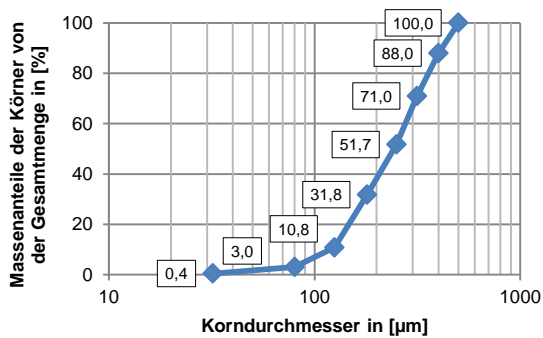
Spangrößenverteilung für R6W8



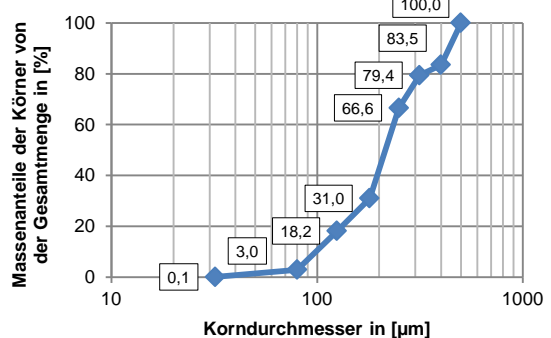
Spangrößenverteilung für R6W9



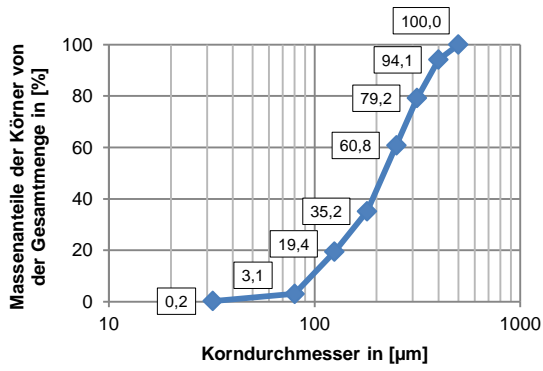
Spangrößenverteilung für R6W10



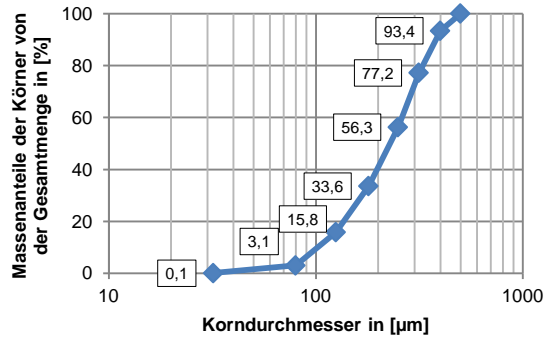
Spangrößenverteilung für R7W1



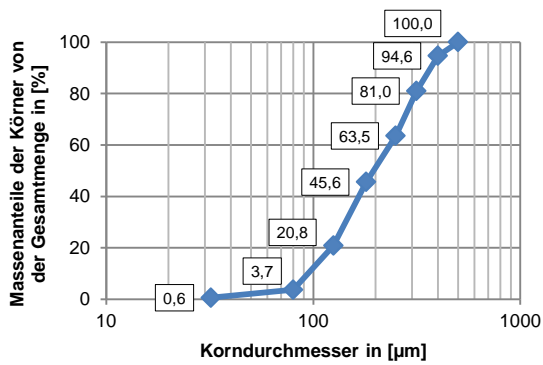
Spangrößenverteilung für R7W2



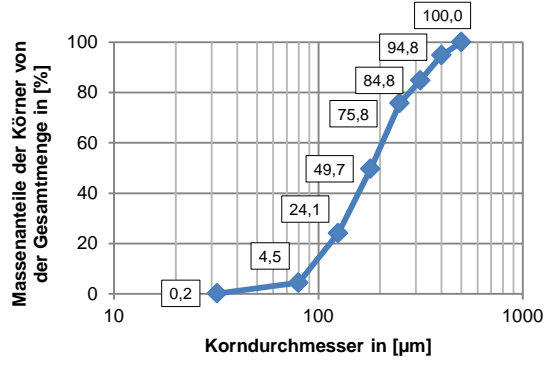
Spangrößenverteilung für R7W3



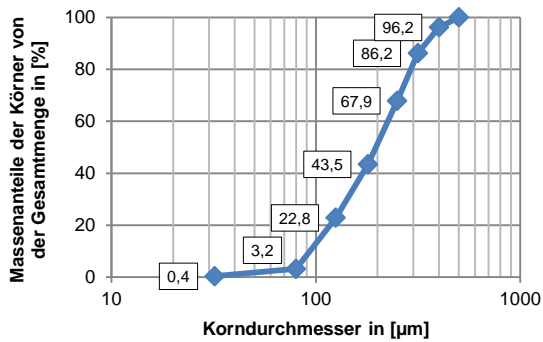
Spangrößenverteilung für R7W4



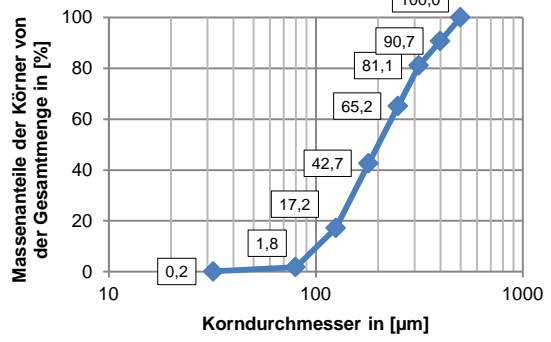
Spangrößenverteilung für R7W5



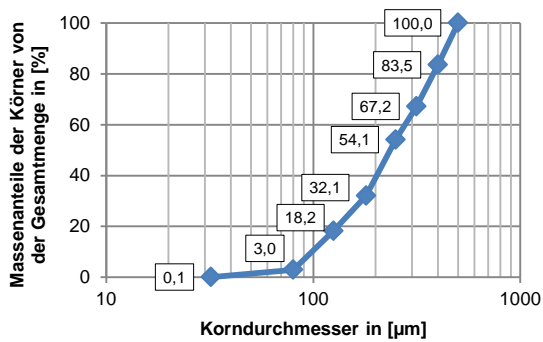
Spangrößenverteilung für R7W6



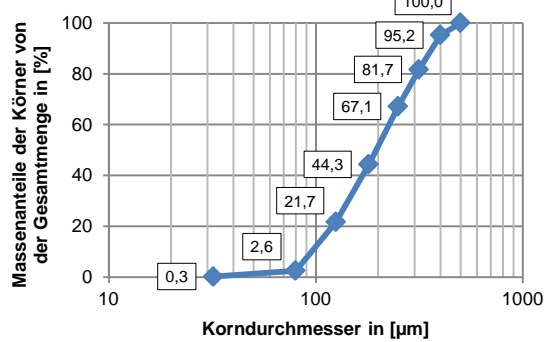
Spangrößenverteilung für R7W7



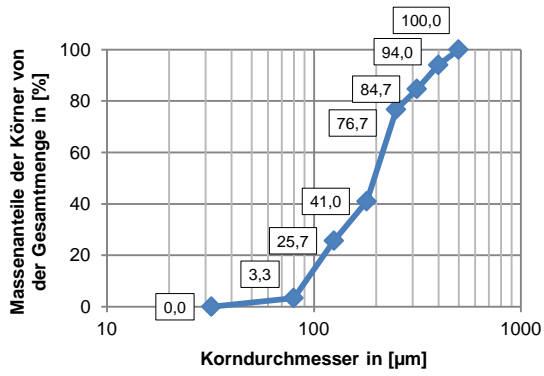
Spangrößenverteilung für R7W8



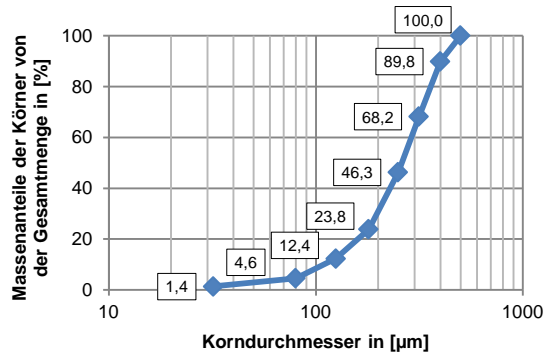
Spangrößenverteilung für R7W9



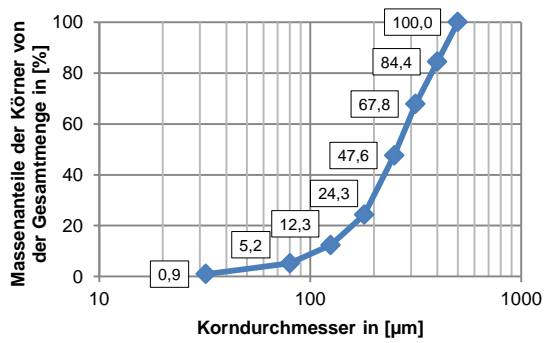
Spangrößenverteilung für R7W10



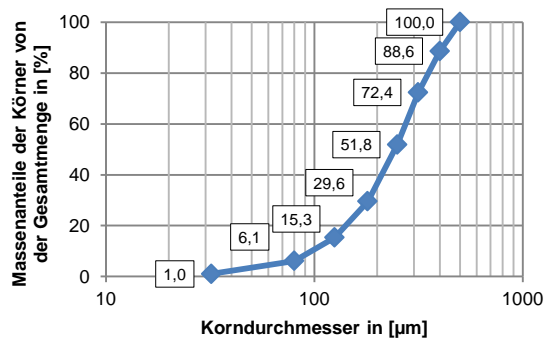
Spangrößenverteilung für R7W11



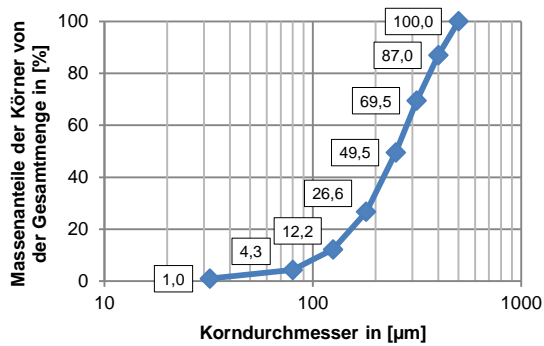
Spangrößenverteilung für R8W1



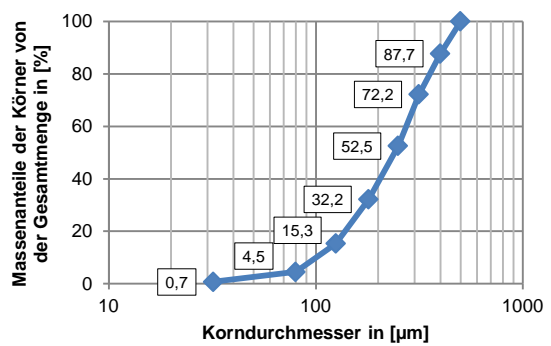
Spangrößenverteilung für R8W2



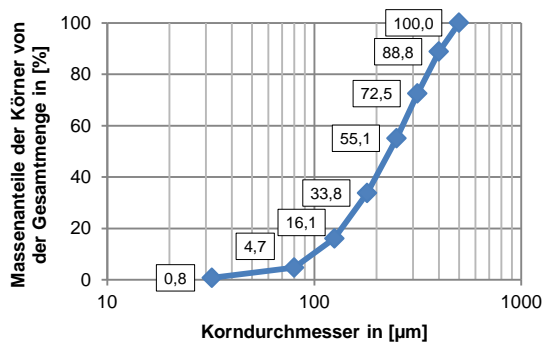
Spangrößenverteilung für R8W3



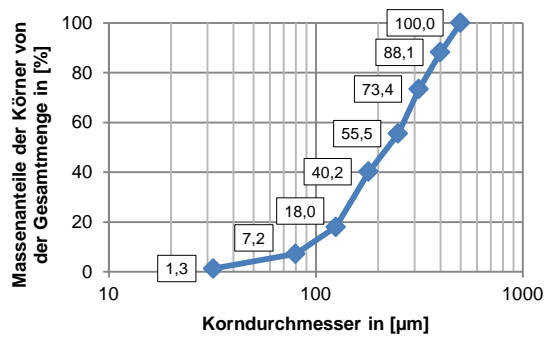
Spangrößenverteilung für R8W4



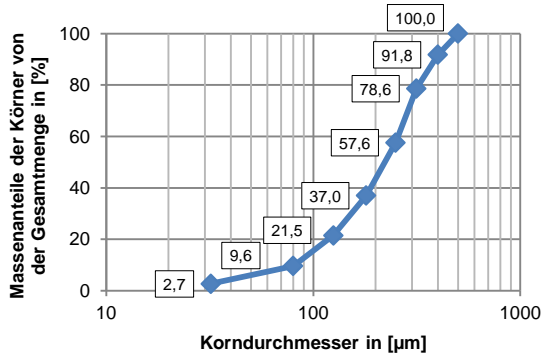
Spangrößenverteilung für R8W5



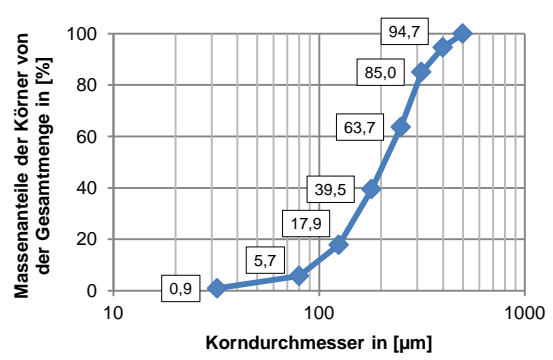
Spangrößenverteilung für R8W6



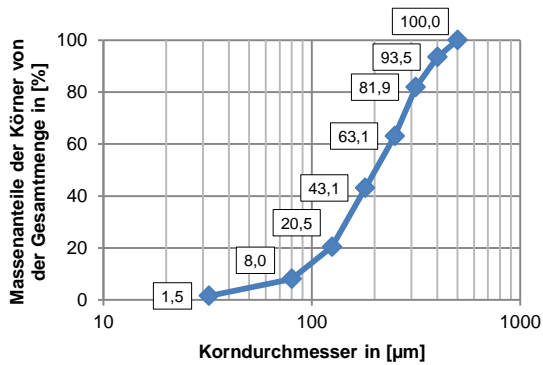
Spangrößenverteilung für R8W7



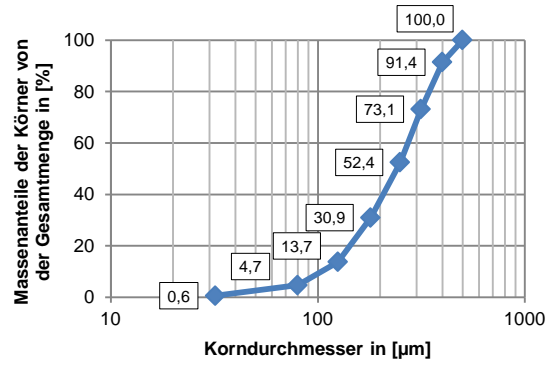
Spangrößenverteilung für R8W8



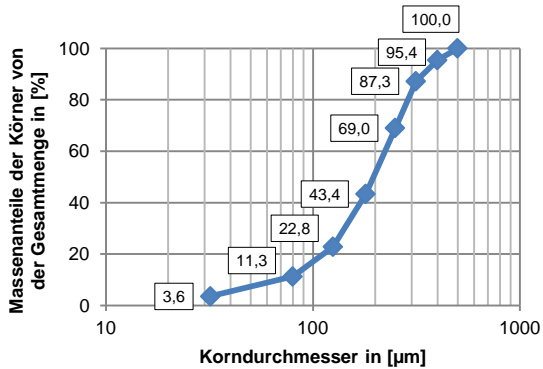
Spangrößenverteilung für R8W9



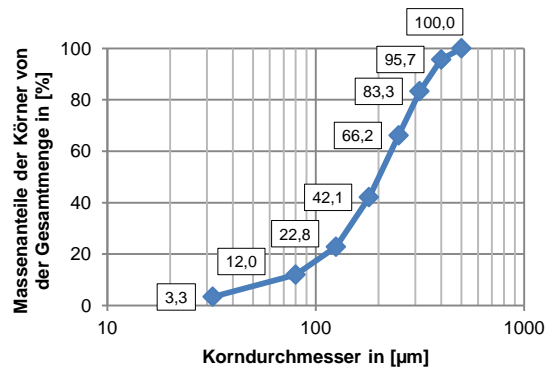
Spangrößenverteilung für R8W10



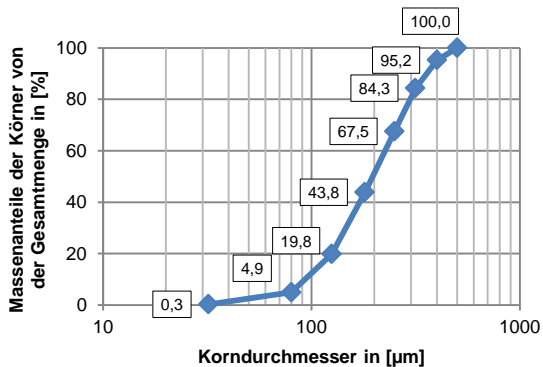
Spangrößenverteilung für R9W1



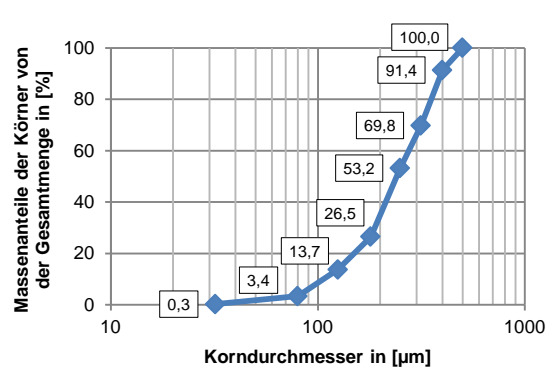
Spangrößenverteilung für R9W2



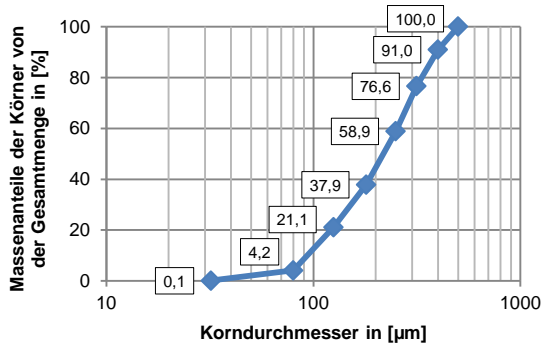
Spangrößenverteilung für R9W3



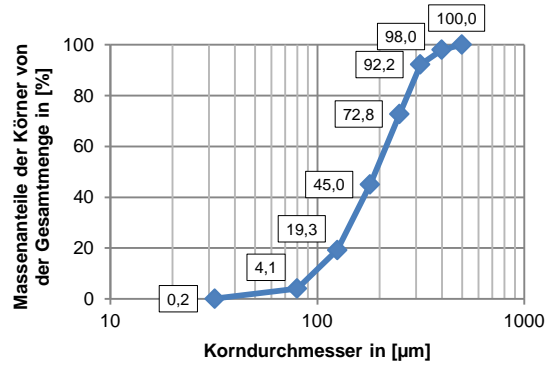
Spangrößenverteilung für R9W4



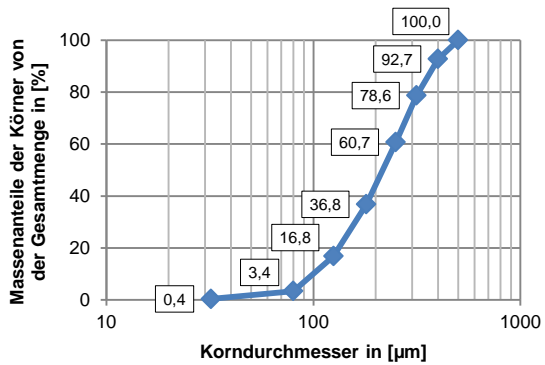
Spangrößenverteilung für R9W5



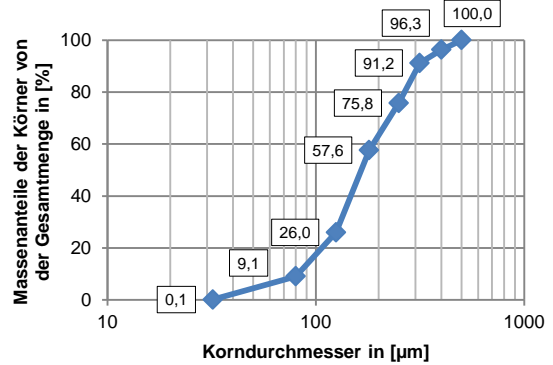
Spangrößenverteilung für R9W6



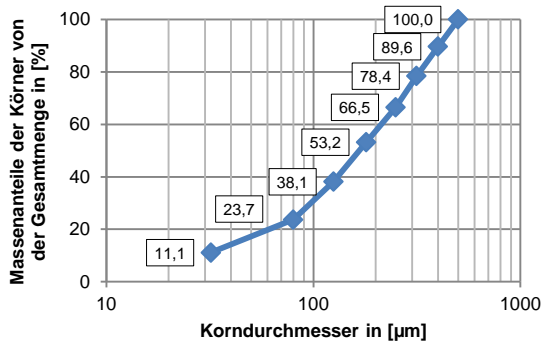
Spangrößenverteilung für R9W7



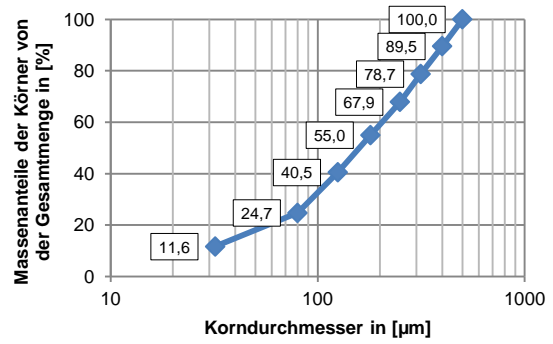
Spangrößenverteilung für R9W8



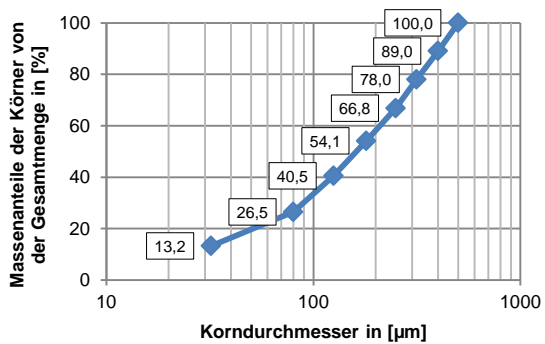
Spangrößenverteilung für R9W9



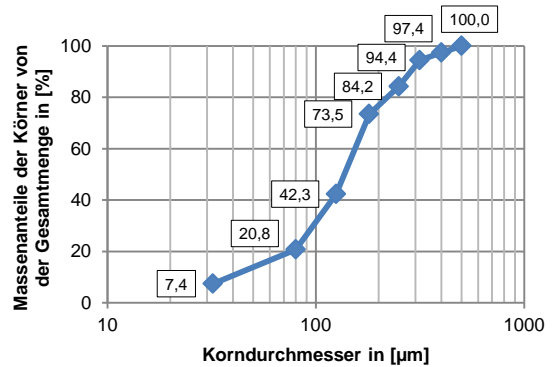
Spangrößenverteilung für R10W1



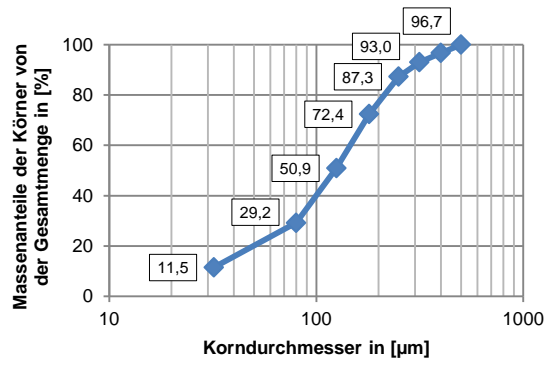
Spangrößenverteilung für R10W2



Spangrößenverteilung für R10W3



Spangrößenverteilung für R11W1



Spangrößenverteilung für R11W2

Anhang B

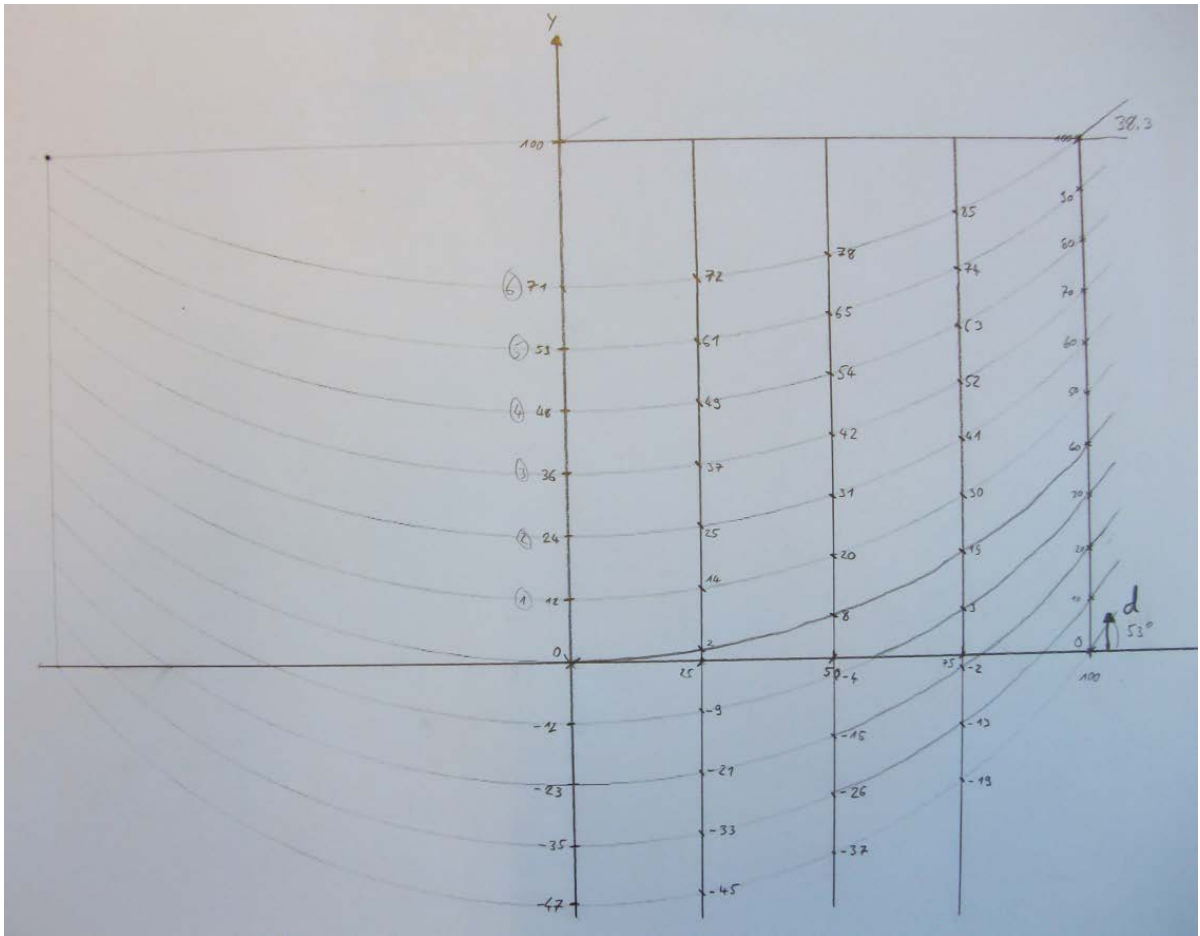


Abbildung B1: Erfasstes Schnittbild eines rechteckig quer liegenden Werkstücks

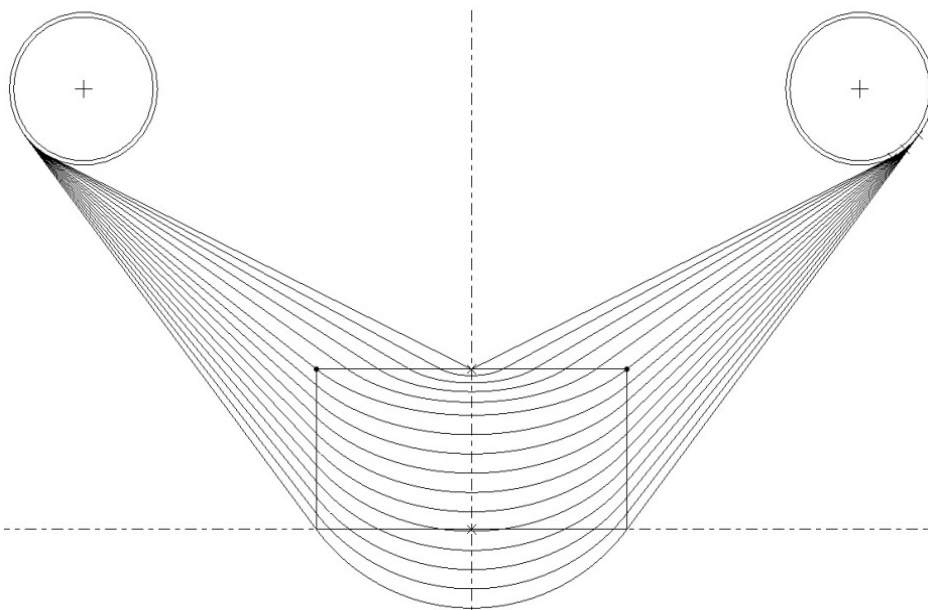
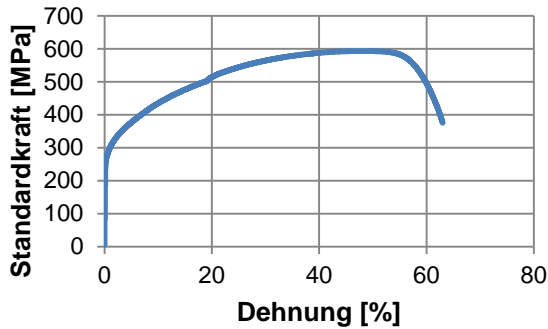


Abbildung B2: Theoretisches Schnittbild eines rechteckig quer liegenden Werkstücks

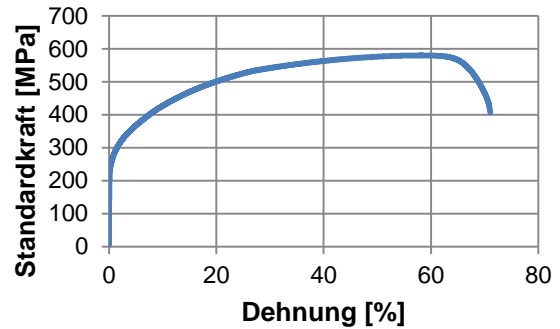
Anhang C

Ergebnisse aus den Zugversuchen nach DIN 50125 für die verwendeten Materialien vergüteter Stahl und nichtrostender Stahl 1.4301.

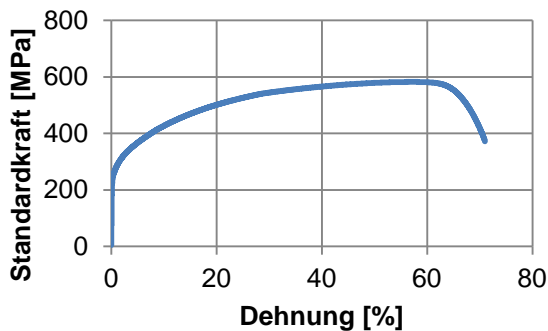
**nichtrostender Stahl 1.4301
Zugprobe DIN 50125 - A12x60
Nummer 1**



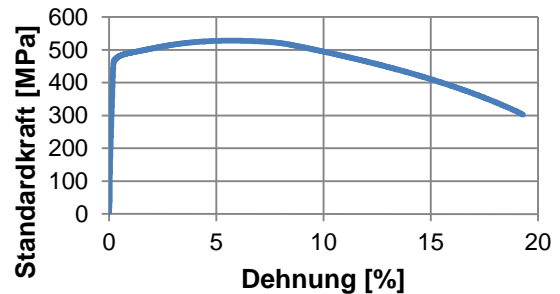
**nichtrostender Stahl 1.4301
Zugprobe DIN 50125 - A12x60
Nummer 2**



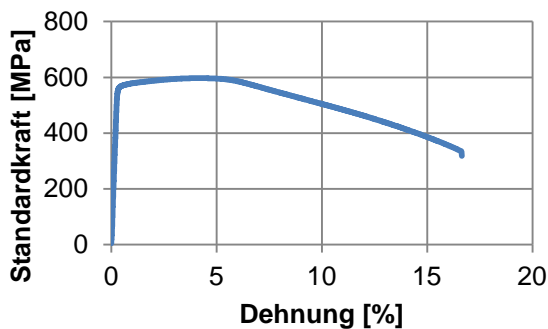
**nichtrostender Stahl 1.4301
Zugprobe DIN 50125 - A12x60
Nummer 3**



**Material: vergüteter Baustahl mit
höherer Streckgrenze
Zugprobe DIN 50125 - A12x60
Nummer 1**



**Material: vergüteter Baustahl mit
höherer Streckgrenze
Zugprobe DIN 50125 - A12x60
Nummer 1**



**Material: vergüteter Baustahl mit
höherer Streckgrenze
Zugprobe DIN 50125 - A12x60
Nummer 2**

